RAY
PUBLISHING & SCIENCE

دليل المهندس الميكانيكي

المرجع في قوانين الميكانيك والمعادلات لمهندسي القدرة والإنتاج والتصميم مع أهم الجداول في متناول يدك



إعداد المهندس عبد الكريم البيكو


منتدى إقراء الثقافي

■ الطبعة الأولى 2004

■ الناشر: شعاع للنشر والعلوم
حارة الرباط 2 - المنطقة 12 - حي السبيل 2
تلفاكس : 2643545 (21) 00963
هاتف : 2643546 (21) 00963
سورية ـ حلب
ص.ب 7875

لمزيد من المعلومات ولشراء كتب الدار مباشرة على الانترنت

يرجى زيارة موقعنا http://www.raypub.com

البريد الالكتروني للقراء: nabilray@scs-net.org

البريد الالكتروني لدور النشر والموزعين: raymail@raypub.com

دليل
المهندس الميكانيكي

إعداد المهندس عبد الكريم البيكو

الإهداء

إلى روح أبي الطاهرة وأمي المكافحة

أخوتي، أخواتي، أقربائي، أصدقائي

إلى كل من يؤمن بحتمية نهوض هذه الأمة

عبد الكريم البيكو

مقدمة

يحوي هذا الدليل على أكثر من 2000 معادلة يحتاجها المهندسون الميكانيكيون لتساعدهم على التصميم وحل المسائل والمشاكل التي يواجهونها، وتفيد هذه المعادلات مهندسي التصميم ومهندسي الإنتاج ومهندسي الطاقة والعديد من الاختصاصات المختلفة لمهندسي الميكانيك.

لقـــد تم إدراج المعـــادلات في هذا الدليل وفق أحد عشر بابا من أبواب الهندسة الميكانيكـــية: عوامل التحويل بين جملتي الواحدات USCS و IS (الجملة الدولية)، معادلات الستاتيك والتحريك، معادلات الإجهادات في العناصر الميكانيكية، المحاور ومعـــادلات المحاور، عناصر الآلات ومعادلات الوثوقية، معادلات تشغيل المعادن، معـــادلات التدفئة والتهوية والتكييف، معادلات الترموديناميك، معادلات هندسة الطاقة، معادلات هندسة الموائع، الاهتزازات.

لقد أوردنا شرحا للمتغيرات الداخلة في المعادلة عقب كل معادلة، وأعطيت معظم المعـــادلات وفـــق نظامـــي الواحدات USCS و IS، حيث أوردنا مختلف عوامل التحويل بين هذين النظامين في الفصل الأول.

لقـــد اعتمدت في تجميع هذا الكتاب على خبرتي العملية والمجالات التي أراها هامة أكثر، وتساعد المهندس في حياته العملية وفي تطبيق معادلات الهندسة الميكانيكية.

يســـتطيع مهندسو الميكانيك - بصرف النظر عن مدى احترافهم - استخدام هذه المعـــادلات لتساعدهم على إتمام أعمالهم على أكمل وجه، مثل تصميم الآلات - التقدير - الاختبار - التعليمات التقنية - التصنيف - الإصلاح إلخ ...

لإيجاد المعادلة المناسبة للحالة التي تواجهها أخي المهندس ابدأ أولا بالفهرس لتحديد

المجال العام للمعادلة، ثم اقرأ النص المكتوب بجانب المعادلة والذي يعطي معلومات عنها، قم بتطبيق المعادلة واستخدم النتائج.

حتى تتمكن من استخدام هذه المعادلات وفق جملة الواحدات التي تناسبك ننصحك بإنشاء قائمة بعوامل التحويل التي تستخدمها بكثرة، ثم اختر الواحدات التي تريد تحويلها من الجملة المستخدمة في المعادلة إلى الجملة التي تريدها، أنشئ جدولا بهذه الواحدات واستخدمه كلما كان ذلك ضروريا.

انتبه عزيزي المهندس إلى المعادلات التي تحوي ثوابت عددية، قم بتحويل هذه الثوابت إلى الجملة التي تريدها، أو قم بإيجاد النتيجة وفق الجملة الموضوعة فيها المعادلة ثم حول النتيجة إلى جملة الواحدات التي تريد.

عبد الكريم بيكو

حلب 2004/2/15

1

عوامل التحول إلى الواحدات في النظام الدولي



الجدول 1.1

نضرب بـ	إلى	للتحويل من
1.233489 E + 03	cubic meter, m^3	acre-foot acre . ft
4.046873 E + 03	square meter, m^2	acre
1.000000 E - 10	meter, m	angstrom, Å
1.013250 E + 05	pascal, Pa	atmosphere, atm (standard)
9.806650 E + 04	pascal, Pa	atmosphere, atm (technical = 1 kgf/cm^2)
1.000000 E + 0.5	pascal, Pa	bar
1.589873 E - 01	cubic meter, m^3	barrel (for petroleum, 42 gal)
2.359737 E - 03	cubic meter, m^3	board foot, board ft
1.05587 E + 03	joule, J	British thermal unit, Btu (mean)
1.442279 E - 01	watt per meter-kelvin, W/(m . K)	British thermal unit, Btu (Internation Table) . in/(h) (ft^2) (°F) (k, thermal conductivity)
2.930711 E - 01	watt, W	British thermal unit, Btu (International Table)/h
5.678263 E + 00	watt per square meter-kelvin, W/(m^2 . K)	British thermal unit, Btu (International Table)/(h) (ft^2) (°F) (C, thermal conductance)
2.326000 E + 03	joule per kilogram, J/kg	British thermal unit, Btu (International Table)/lb
4.186800 E + 03	joule per kilogram-kelvin, J/(kg . K)	British thermal unit, Btu (International Table)/(lb) (°F) (c, heat capacity)
3.725895 E + 04	joule per cubic meter, J/m^3	British thermal unit per cubic foot, Btu (International Table)/ft^3
3.523907 E - 02	cubic meter, m^3	bushel (U.S.)

لضرب بـــ	إلى	للتحويل من
4.19002 E + 00	joule, J	calorie (mean)
1.550003 E + 03	candela per square meter, cd/m^2	candela per square inch, cd/in^2
1.33322 E + 03	pascal, Pa	centimeter, cm, of mercury (0°C)
9.80638 E + 01	pascal, Pa	centimeter, cm, of water (4°C)
2.011684 E + 01	meter, m	chain
5.067075 E - 10	square meter, m^2	circular mil
8.640000 E + 04	second, s	day
8.616409 E + 04	second, s	day (sidereal)
1.745329 E - 02	radian, rad	degree (angle)
$T_K = t_C + 273.15$	kelvin, K	degree Celsius
$t_C = (t_F - 32)/1.8$	degree Celsius, °C	degree Fahrenheit
$T_K = (t_F + 459.67)/1.8$	kelvin, K	degree Fahrenheit
$T_K = T_R/1.8$	kelvin, K	degree Rankine
1.761102 E - 01	kelvin-square meter per watt, $K \cdot m^2/W$	(°F) (h) (ft^2)/Btu (International Table) (R, thermal resistance)
6.933471 E + 00	kelvin-meter per watt, $K \cdot m/W$	(°F) (h) (ft^2)[Btu (International Table) . in] (thermal resistivity)
1.000000 E - 05	newton, N	dyne, dyn
1.828804 E + 00	meter, m	fathom
3.048000 E - 01	meter, m	foot, ft
3.048006 E - 01	meter, m	foot, ft (U.S. survey)
2.98898 E + 03	pascal, Pa	foot, ft, of water (39.2°F) (pressure)
9.290304 E - 02	square meter, m^2	square foot, ft^2

نضرب بـ	إلى	للتحويل من
2.580640 E - 05	square meter per second, m^2/s	square foot per hour, ft^2/h (thermal dirrusivity)
9.290304 E - 02	square meter per second, m^2/s	square foot per second, ft^2/s
2.831685 E - 02	cubic meter, m^3	cubic foot, ft^3 (volume or section modulus)
4.719474 E - 04	cubic meter per second, m^3/s	cubic foot per minute, ft^3/min
2.831685 E - 02	cubic meter per second, m^3/s	cubic foot per second, ft^3/s
8.630975 E - 03	meter to fourth power, m^4	foot to the fourth power, ft^4 (area moment of inertia)
5.080000 E - 03	meter per second, m/s	foot per minute, ft/min
3.048000 E - 01	meter per second, m/s	foot per second, ft/s
3.048000 E - 01	meter per second squared, m/s^2	foot per second squared, ft/s^2
1.076391 E + 01	lux, lx	footcandle, fc
3.426259 E + 00	candela per square meter, cd/m^2	foot-lambert, ft . L
1.355818 E + 00	joule, J	foot-pound force, ft . lbf
2.259697 E - 02	watt, W	foot-pound force per minute, ft . lbf/min
1.355818 E + 00	watt, W	foot-pound force per second, ft . lbf/s
4.214011 E - 02	joule, J	foot poundal, ft poundal
9.806650 E + 00	meter per second squared, m/s^2	free fall, standard g
4.546090 E - 03	cubic meter, m^3	gallon, gal (Canadian liquid)
4.546092 E - 03	cubic meter, m^3	gallon, gal (U.K. liquid)
4.404884 E - 03	cubic meter, m^3	gallon, gal (U.S. dry)

نضرب بـ	إلى	للتحويل من
3.785412 E - 03	cubic meter, m^3	gallon, gal (U.S. liquid)
4.381264 E - 08	cubic meter per second, m^3/s	gallon, gal (U.S. liquid) per day
6.309020 E - 05	cubic meter per second, m^3/s	gallon, gal (U.S. liquid) per minute
9.000000 E - 01	degree (angular)	grad
1.570796 E - 02	radian, rad	grad
6.479891 E - 05	kilogram, kg	grain, gr
1.000000† E - 03	kilogram, kg	gram, g
1.000000† E + 04	square meter, m^2	hectare, ha
7.456999 E + 02	watt, W	horsepower, hp (550 ft . lbf/s)
9.80950 E + 03	watt, W	horsepower, hp (boiler)
7.460000 E + 02	watt, W	horsepower, hp (electric)
7.46043 E + 02	watt, W	horsepower, hp (water)
7.4570 E + 02	watt, W	horsepower, hp (U.K.)
3.600000 E + 03	second, s	hour, h
3.590170 E + 03	second, s	hour, h (sidereal)
2.540000 E - 02	meter, m	inch, in
3.38638 E + 03	pascal, Pa	inch of mercury, inHg (32°F) (perssure)
2.4884 E + 02	pascal, Pa	inch of water, inH_2O (60°F) (perssure)
3.37685 E + 03		inch of mercury, in Hg (60°F) (pressure)
6.451600 E - 04	square meter, m^2	square inch, in^2
6.451600 E - 05	cubic meter, m^3	cubic inch, in^3 (volume or section modulus)

تضرب بـ	إلى	للتحويل من
4.162314 E - 07	meter to fourth power, m^4	inch to the fourth power, in^4 (area moment of inertia)
2.540000 E - 02	meter per second, m/s	inch per second, in/s
$t_C = T_K - 273.15$	degree Celsius, °C	kelvin, K
9.806650 E + 00	newton, N	kilogram force, kgf
9.806650 E + 00	newton-meter, N . m	kilogram force-meter, kg . m
9.806650 E + 00	kilogram, kg	kilogram force-second squared per meter, kgf . s^2/m (mass)
9.806650 E + 04	pascal, Pa	kilogram force per square centimeter, kgf/cm^2
9.806650 E + 00	pascal, Pa	kilogram force per square meter, kgf/m^2
9.806650 E + 06	pascal, Pa	kilogram force per square millimter, kgf/mm^2
2.777778 E - 01	meter per second, m/s	kilometer per hour, km/h
3.600000 E + 06	joule, J	kilowatthour, kWh
4.448222 E + 03	newton, N	kip (1000 lbf)
6.894757 E + 06	pascal, Pa	kip per square inch, kip/in^2 or ksi
5.144444 E - 01	meter per second, m/s	knot, kn (international)
3.183099 E + 03	candela per square meter, cd/m^2	lambert, L
1.000000 E - 03	cubic meter, m^3	liter
1.000000 E - 08	weber, Wb	maxwell
1.000000 E + 00	siemens, S	mho
2.540000 E - 08	meter, m	microinch, μin
1.000000 E - 06	meter, m	micrometer, μm

نضرب بـ	إلى	للتحويل من
2.540000 E - 05	meter, m	miles, mi
1.609344 E + 03	meter, m	mile, mi (international)
1.609347 E + 03	meter, m	mile, mi (U.S. statute)
1.852000 E + 03	meter, m	mile, mi (international nautical)
1.852000 E + 03	meter, m	mile, mi (U.S. nautical)
2.589988 E + 06	square meter, m^2	square mile, mi^2 (international)
2.589998 E + 06	square meter, m^2	square mile, mi^2 (U.S. statute)
4.470400 E - 01	meter per second, m/s	mile per hour, mi/h (international)
1.609344 E + 00	kilometer per hour, km/h	mile per hour, mi/h (international)
1.000000 E + 02	pascal, Pa	millibar, mbar
1.33322 E + 02	pascal, Pa	millimeter of mercury, mmHg (0°C)
2.908882 E - 04	radian, rad	minute (angle)
6.000000 E + 01	second s	minute, min
5.983617 E + 01	second, s	minute (sidereal)
2.834952 E - 02	kilogram, kg	ounce, oz (avoirdupois)
3.110348 E - 02	kilogram, kg	ounce oz (troy or apothecary)
2.841307 E - 05	cubic meter, m^3	ounce, oz (U.K. fluid)
2.957353 E - 05	cubic meter, m^3	ounce, oz (U.S. fluid)
2.780139 E - 01	newton, N	ounce force, ozf
7.061552 E - 03	newton-meter, N.m	ounce force-inch, ozf . in
3.051517 E - 01	kilogram per square meter, kg/m^2	ounce per square foot, oz (avoirdupois)/ft^2
3.390575 E - 02	kilogram per square meter, kg/m^2	ounce per square yard, oz (avoirdupois)/yd^2

نضرب بـ	إلى	للتحويل من
5.72135 E - 11	kilogram per pascal-second-meter, kg/(Pa . s . m)	perm (0°C)
5.74525 E - 11	kilogram per pascal-second-meter, kg/(Pa . s . m)	perm (23°C)
1.45322 E - 12	kilogram per pascal-second-meter, Kg/(Pa . s . m)	perm-inch, perm. in (0°C)
1.45929 E - 12	kilogram per pascal-second-meter, kg/(Pa . s . m)	perm-inch, perm . in (23°C)
5.506105 E - 04	cubic meter, m^3	pint, pt (U.S. dry)
4.731765 E - 04	cubic meter, m^3	pint, pt (U.S. liquid)
1.000000 E - 01	pascal-second, Pa . s	poise, P (absolute viscosity)
4.535924 E - 01	kilogram, kg	pound, lb (avoirdupois)
3.732417 E - 01	kilogram, kg	pound, lb (troy or apothecary)
2.926397 E - 04	kilogram-square meter, kg . m^2	pound-square inch, lb . in^2 (moment of inertia)
1.488164 E + 00	pascal-second, Pa . s	pound per foot-second, lb/ft . s
4.882428 E + 00	kilogram per square meter, kg/m^2	pound per square foot, lb/ft^2
1.601846 E - 01	kilogram per cubic meter, kg/m^3	pound per cubic foot, lb/ft^3
9.977633 E + 01	kilogram per cubic meter, kg/m^3	pound per gallon, lb/gal (U.K. liquid)
1.198264 E + 02	kilogram per cubic meter, kg/m^3	pound per gallon, lb/gal (U.S. liquid)
1.259979 E - 04	kilogram per second, kg/s	pound per hour, lb/h
2.767990 E + 04	kilogram per cubic meter, kg/m^3	pound per cubic inch, lb/in^3

نضرب بـــ	إلى	للتحويل من
7.559873 E - 03	kilogram per second, kg/s	pound per minute, lb/min
4.535924 E - 01	kilogram per second, kg/s	pound per second, lb/s
5.932764 E - 01	kilogram per cubic meter, kg/m^3	pound per cubic yard, lb/yd^3
1.382550 E - 01	newton, N	poundal
4.448222 E + 00	newton, N	pound force, lbf
1.355818 E + 00	newton-meter, N . m	pound force-foot, lbf . ft
1.459390 E + 01	newton per meter, N/m	pound force per foot, lbf/ft
4.788026 E + 01	pascal, Pa	pound force per square foot, lbf/ft^2
1.751268 E + 02	newton per meter, N/m	pound force per inch, lbf/in
6.894757 E + 03	pascal, Pa	pound force per square inch, lbf/in^2 (psi)
1.101221 E - 03	cubic meter, m^3	quart, qt (U.S. dry)
9.463529 E - 04	cubic meter, m^3	quart, qt (U.S. liquid)
5.029210 E + 00	meter, m	rod
4.848137 E - 06	radian, rad	second (angle)
9.972696 E - 01	second, s	second (sidereal)
9.290304 E + 00	square meter, m^2	square (100 ft^2)
2.916667 E - 02	kilogram, kg	ton (assay)
1.016047 E + 03	kilogram, kg	ton (long, 2240 lb)
1.000000 E + 03	kilogram, kg	ton (metric), t
3.516800 E + 03	watt, W	ton (refrigeration)
2.831685 E + 00	cubic meter, m^3	ton (register)
9.071847 E + 02	kilogram, kg	ton (short 2000 lb)
1.328939 E + 03	kilogram per cubic meter, kg/m^3	ton (long) per cubic yard, ton/yd^3

نضرب بــ	إلى	للتحويل من
1.186553 E + 03	kilogram per cubic meter, kg/m^3	ton (short) per cubic yard, ton/yd^3
8.896444 E + 03	newton, N	ton force (2000 lbf)
1.000000 E + 03	kilogram, kg	tonne, t
3.600000 E + 03	joule, J	watt hour, Wh
9.144000 E - 01	meter, m	yard, yd
8.361274 E - 01	square meter, m^2	square yard, yd^2
7.645549 E - 01	cubic meter, m^3	cubic yard, yd^3
3.153600 E + 07	second, s	year (365 days), yr
3.155815 E + 07	second, s	year (sidereal)

2

معادلات الستاتيك والتحريك

معادلات الحركة

رموز واصطلاحات

t = الزمن، s.

s = الإزاحة الخطية، ft (m).

v = السرعة الخطية، ft/s (m/s).

V_0 = السرعة الخطية عند اللحظة الصفرية (مبدأ الزمن)، ft/s (m/s).

a = التسارع الخطي، ft/s^2 (m/s^2).

θ = الإزاحة الزاوية، rad.

ω = السرعة الزاوية، rad/s.

ω_0 = السرعة الزاوية عند اللحظة الصفرية (مبدأ الزمن)، rad/s.

α = التسارع الزاوي، rad/s^2.

w = كتلة الجسم، lbm (kg mass).

f = قوة التسارع، lb (N).

g_c = عامل التحويل = 32.2 $(lbm)(ft)/(lbf.s^2)$ $(9.81\ m/s^2)$

متغير = ω	متغير = v	ثابت = ω	ثابت = v
$\omega = d\theta/dt$	$v = ds/dt$	$\omega = \theta/t$	$v = s/t$

متغير = α	متغير = a	ثابت = α	ثابت = a
$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$	$\omega = \omega_0 + \alpha t$	$v = V_0 + at$
$\omega = \int \alpha\, dt$	$v = \int a\, dt$	$\theta = \omega_0 t + 1/2\alpha t^2$	$s = V_0 t + 1/2at^2$
$\theta = \int \omega\, dt$	$s = \int v\, dt$	$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + 2\alpha\theta}$	$v = \sqrt{v_0^2 + 2.a.s}$

ومن أجل تسارع نظامي:

$$f = \frac{W}{g_c} a$$

الستاتيك

نقول عن أي نظام قوة في الفضاء أنه متوازن إذا كانت محصلة القوة معدومة ومحصلة العزم معدومة أيضاً. ويعبر عن ذلك كما يلي:

$$\sum F_x = \sum F_y = \sum F_z = 0$$
$$\sum M_x = \sum M_y = \sum M_z = 0$$

حيث:

F = القوة، lb (N).

M = العزم، ft.lb (N.m).

x, y, z = محاور الإحداثيات.

عزم العطالة

عزم العطالة: يُعطى عزم العطالة I بالنسبة لمحور معين بالمعادلتين التاليتين:

للأجسام المصمتة $I = \int y^2 \, dm$ lb.ft² (Kg.m²)

للمساحات المستوية $I = \int y^2 \, dA$ ft⁴ (m⁴)

حيث:

y = المسافة بين عناصر الكتل أو المساحة والمحور المرجعي، ft (m).

dm = تفاضل الكتلة، lb (Kg).

dA = تفاضل المساحة، ft^2 (m^2).

نصف قطر الدوران: يعبّر عن نصف قطر الدوران بالطول k، ft (m)، والممثل بالعلاقة:

للأجسام الصلبة $$I = \int y^2 dm = K^2 m$$

للمساحة المستوية $$I = \int y^2 dA = K^2 A$$

حيث:

m = الكتلة الكلية، lb (Kg).

A = المساحة، ft^2 (m^2).

عزم العطالة ونصف قطر الدوران حول المحاور المتوازية: يُعطى عزم العطالة حول أي محور بالعلاقة التالية:

للأجسام الصلبة $$I = I_{cg} + a^2 m$$

للمساحة المستوية $$I = I_{cg} + a^2 A$$

حيث: I_{cg} = عزم العطالة للأجسام الصلبة $lb.ft^2$ ($Kg.m^2$)، أو المساحة ft^4 (m^4)، حول محور مواز للمحور المرجعي ومار من مركز الثقل.

a = المسافة بين المحور المرجعي والمحور المار من مركز الثقل ft (m).

وبالتالي يمكننا أن نكتب:

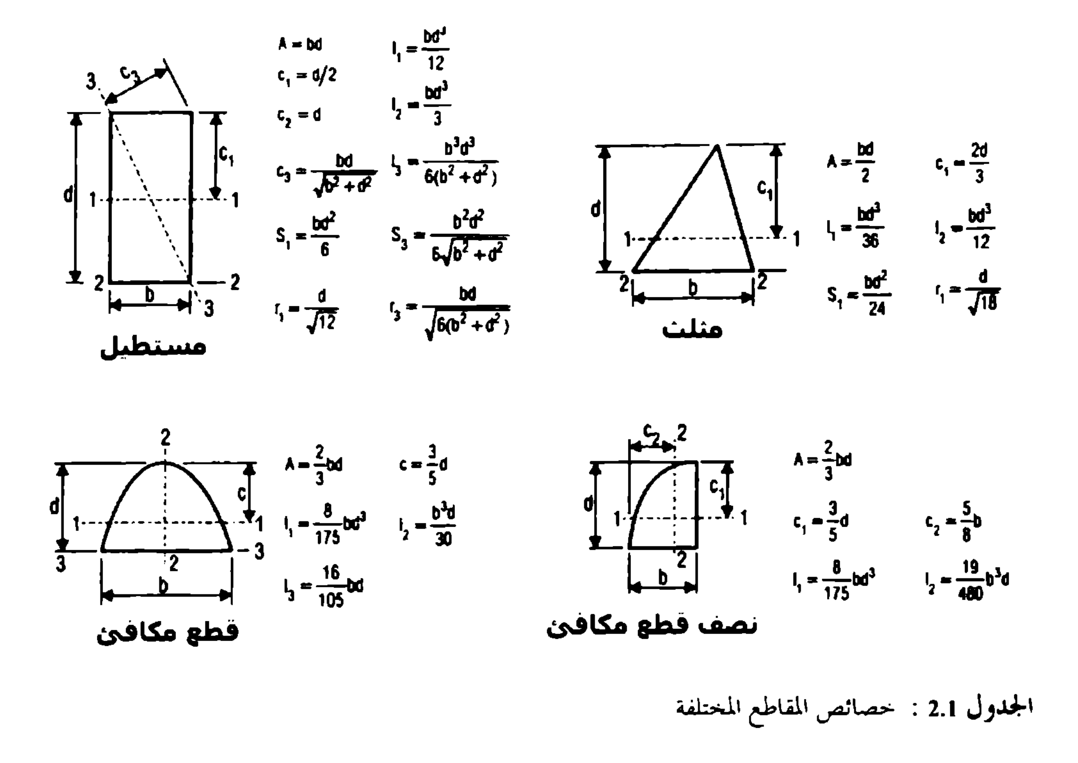
$$K^2 = K_{cg}^2 + a^2$$

حيث: K_{cg} = نصف قطر الدوران لمركز الثقل، ft (m).

عزم العطالة القطبي : يُعطى عزم العطالة القطبي J لمساحة ما حول محور عمودي (أو متعامد) على تلك المساحة بالعلاقة:

$$J = I_1 + I_2 \qquad ft^4\ (m^4)$$

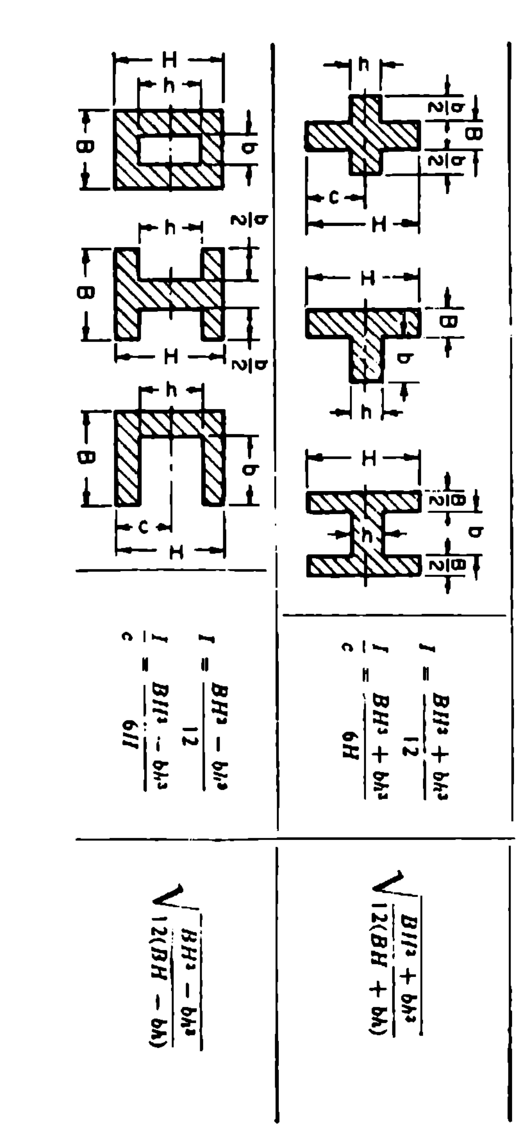
حيث يمثل I_1 وI_2 عزمي العطالة حول أي محورين متعامدين واقعين في مستوي تلك المساحة ويقطعان المحور العمودي على المستوي.



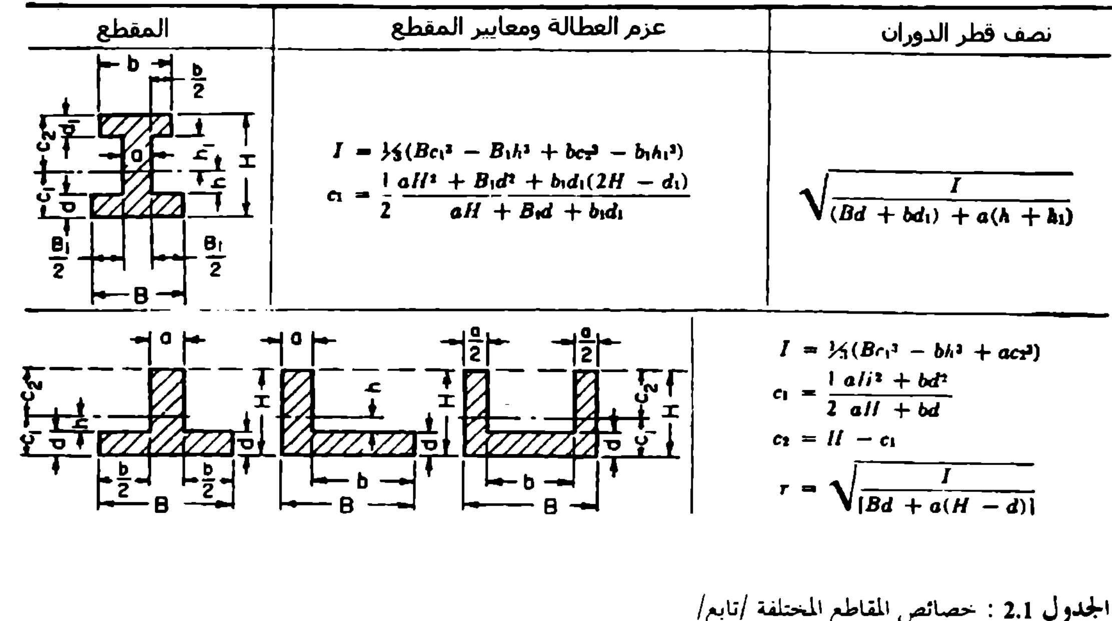
الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة

المقطع	عزم العطالة	معايير المقطع	نصف قطر الدوران
مضلع منساوي الأضلاع A = المساحة R = قطر الدائرة الخارجية والمارة برؤوسه r = قطر الدائرة الداخلية المماسة لأضلاعه n = عدد الأضلاع a = طول الضلع	$I = \frac{A}{24}(6R^2 - a^2)$ $= \frac{A}{48}(12r^2 + a^2)$ $= \frac{AR^2}{4}$ (approx)	$\frac{I}{c} = \frac{I}{r}$ $= \frac{I}{R\cos\frac{180^\circ}{n}}$ $= \frac{AR}{4}$ (approx)	$\sqrt{\frac{6R^2 - a^2}{24}} \approx \frac{R}{2}$ $\sqrt{\frac{12r^2 + a^2}{48}}$
b, c, h, $\frac{b_1}{2}$, $\frac{b_1}{2}$	$I = \frac{6b^2 + 6bb_1 + b_1^2}{36(2b + b_1)} h^3$ $c = \frac{1}{3}\frac{3b + 2b_1}{2b + b_1} h$	$\frac{I}{c} = \frac{6b^2 + 6bb_1 + b_1^2}{12(3b + 2b_1)} h^2$	$\frac{h\sqrt{12b^2 + 12bb_1 + 2b_1^2}}{6(2b + b_1)}$

الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/



الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/



المقطع	عزم العطالة ومعايير المقطع	نصف قطر الدوران
	$I = \frac{1}{3}(Bc_1^3 - B_1h^3 + bc_2^3 - b_1h_1^3)$ $c_1 = \frac{1}{2}\frac{aH^2 + B_1d^2 + b_1d_1(2H - d_1)}{aH + B_1d + b_1d_1}$	$\sqrt{\frac{I}{(Bd + bd_1) + a(h + h_1)}}$
		$I = \frac{1}{3}(Bc_1^3 - bh^3 + ac_2^3)$ $c_1 = \frac{1}{2}\frac{aH^2 + bd^2}{aH + bd}$ $c_2 = H - c_1$ $r = \sqrt{\frac{I}{[Bd + a(H - d)]}}$

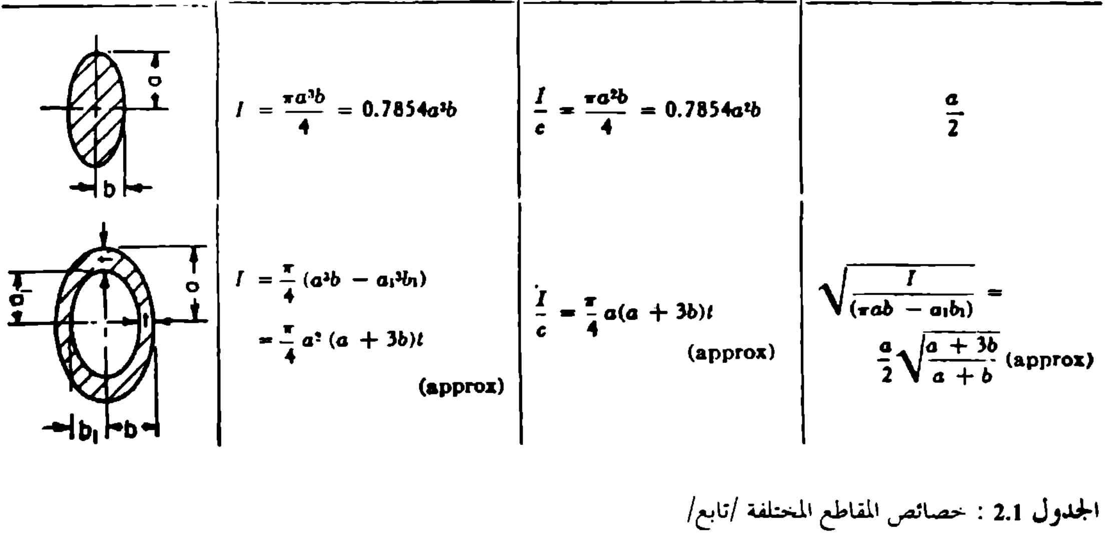
الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

المقطع	عزم العطالة	معايير المقطع	نصف قطر الدوران
d, r	$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{A}{4} r^2$ $= 0.05 d^4$ (approx)	$\frac{I}{c} = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{\pi r^3}{4} = \frac{A}{4} r$ $= 0.1 d^3$ (approx)	$\frac{r}{2} = \frac{d}{4}$
d, r, R, D $d_m = \frac{1}{2}(D + d)$ $s = \frac{1}{2}(D - d)$	$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$ $= \frac{\pi}{4}(R^4 - r^4)$ $= \frac{1}{4} A (R^2 + r^2)$ $= 0.05(D^4 - d^4)$ (approx)	$\frac{I}{c} = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D}$ $= \frac{\pi}{4} \frac{R^4 - r^4}{R}$ $= 0.8 d_m^2 s$ (approx) when $\frac{s}{d_m}$ is very small	$\frac{\sqrt{R^2 + r^2}}{2} = \frac{\sqrt{D^2 + d^2}}{4}$

الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

المقطع	عزم العطالة	معايير المقطع	نصف قطر الدوران
c_1, c_2, r	$I = r^4\left(\frac{\pi}{8} - \frac{8}{9\pi}\right)$ $= 0.1098r^4$	$\frac{I}{c_2} = 0.1908r^3$ $\frac{I}{c_1} = 0.2587r^3$ $c_1 = 0.4244r$	$\frac{\sqrt{9\pi^2 - 64}}{6\pi}r = 0.264r$
c_1, c_2, t, r, r_1, R	$I = 0.1098(R^4 - r^4)$ $- \frac{0.283R^2r^2(R - r)}{R + r}$ $= 0.3tr_1^3$ (approx) when $\frac{t}{r_1}$ is very small	$c_1 = \frac{4}{3\pi}\frac{R^2 + Rr + r^2}{R + r}$ $c_2 = R - c_1$	$\sqrt{\frac{2I}{\pi(R^2 - r^2)}}$ $= 0.31r_1$ (approx)

الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

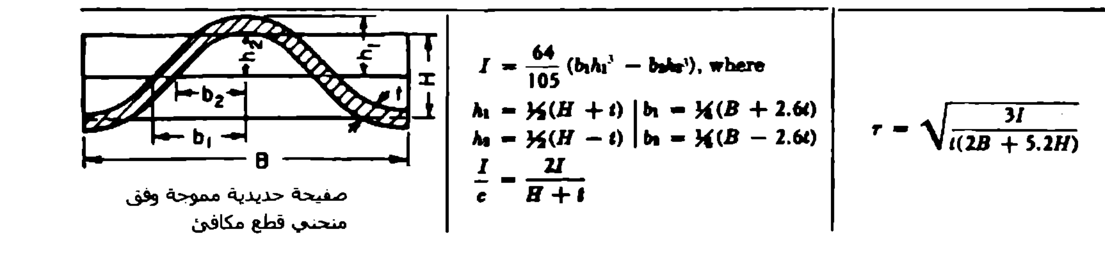


(elliptical section: a, b)	$I = \frac{\pi a^3 b}{4} = 0.7854a^3b$	$\frac{I}{c} = \frac{\pi a^2 b}{4} = 0.7854a^2b$	$\frac{a}{2}$
(hollow elliptical section: a, b, a_1, b_1, t)	$I = \frac{\pi}{4}(a^3b - a_1^3b_1)$ $= \frac{\pi}{4}a^2(a + 3b)t$ (approx)	$\frac{I}{c} = \frac{\pi}{4}a(a + 3b)t$ (approx)	$\sqrt{\frac{I}{(\pi ab - a_1b_1)}} = \frac{a}{2}\sqrt{\frac{a + 3b}{a + b}}$ (approx)

الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

المقطع	عزم العطالة ومعايير المقطع	نصف قطر الدوران
	$I = \frac{1}{12}\left[\frac{3\pi}{16}d^4 + b(h^3 - d^3) + b^2(h - d)\right]$ $\frac{I}{c} = \frac{1}{6h}\left[\frac{3\pi}{16}d^4 + b(h^3 + d^3) + b^2(h - d)\right]$	$\sqrt{\frac{I}{\pi\frac{d^2}{4} + 2b(h - d)}}$ (approx)
	$I = \frac{t}{4}\left(\frac{\pi B^3}{16} + B^2h + \frac{\pi B h^2}{2} + \frac{2}{3}h^3\right)$ $h = H - \frac{1}{2}B$ $\frac{I}{c} = \frac{2I}{H + t}$	$\sqrt{\frac{I}{2\left(\frac{\pi B}{4} + h\right)t}}$

الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/



صفيحة حديدية مموجة وفق منحني قطع مكافئ

$$I = \frac{64}{105}(b_1 h_1^3 - b_2 h_2^3), \text{ where}$$

$$h_1 = \tfrac{1}{2}(H + t) \quad \Big| \quad b_1 = \tfrac{1}{4}(B + 2.6t)$$

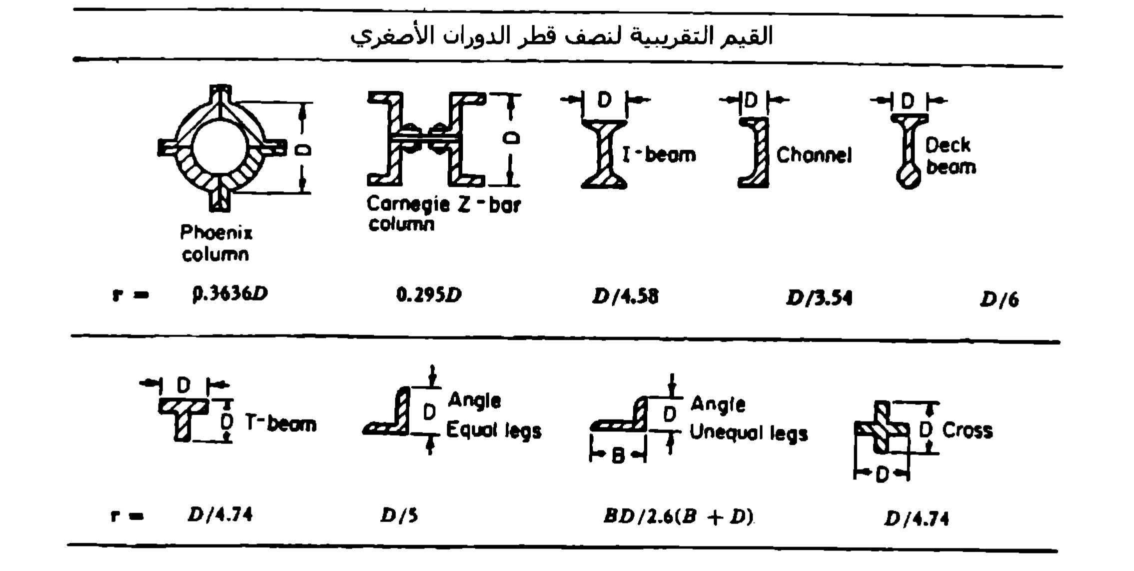
$$h_2 = \tfrac{1}{2}(H - t) \quad \Big| \quad b_2 = \tfrac{1}{4}(B - 2.6t)$$

$$\frac{I}{c} = \frac{2I}{H + t}$$

$$r = \sqrt{\frac{3I}{t(2B + 5.2H)}}$$

الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

القيم التقريبية لنصف قطر الدوران الأصغري



	Phoenix column	Carnegie Z-bar column	I-beam	Channel	Deck beam
r =	$0.3636D$	$0.295D$	$D/4.58$	$D/3.54$	$D/6$

	T-beam	Angle Equal legs	Angle Unequal legs	Cross
r =	$D/4.74$	$D/5$	$BD/2.6(B+D)$	$D/4.74$

الجدول 2.1 : خصائص المقاطع المختلفة /تابع/

التحريك

طاقة الجسم الصلب

يمتلك الجسم الصلب طاقة حركية تنتج عن حركته:

الطاقة الحركية = $\frac{1}{2}mv^2$ للحركة الانسحابية

الطاقة الحركية = $\frac{1}{2}I_0\omega^2$ للحركة الدورانية

حيث:

m = الكتلة، lb (Kg).

I_0 = عزم العطالة حول محور الدوران، $lb.ft^2$ ($Kg.m^2$).

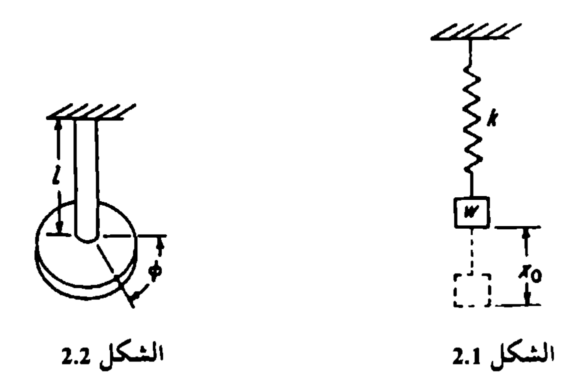
v = السرعة، ft/s (m/s).

ω = السرعة الزاوية، rad/s.

ويمتلك الجسم الصلب طاقة كامنة تكون ناتجة عن وضعه، والتي تعني، تلك الطاقة القادرة على القيام بعمل.

الاهتزازات الحرة للأنظمة وحيدة درجة الحرية

إذا أزيح نظام مرن عن وضع توازنه بقوة، فستصبح قوى المرونة للنظام في الوضع المزاح غير مكافئة للحمل، وبالتالي سينشأ لدينا اهتزاز (الشكل 2.1).



الشكل 2.1 الشكل 2.2

رموز واصطلاحات

K = ثابت صلابة النابض للنظام المرن، lb/ft (N/m).

$v = \frac{dx}{dt}$ = السرعة، ft/s (m/s).

v_0 = السرعة الابتدائية، ft/s (m/s).

t = الزمن، s.

W = الوزن (مع إهمال وزن النابض بالنسبة للوزن W) lb (Kg).

f = تردد الاهتزاز، s^{-1}.

p = دور الاهتزاز = $\sqrt{Kg_C / W}$، s^{-1}.

t = زمن هزة كاملة واحدة، s.

$\omega = P$، في حالة الدوران، rad/s.

$g_C = 32.2$ (lbm) (ft)/(lbf) (s^2) (9.81 m/s^2).

x = مقدار إزاحة W عن وضع توازنه، ft (m).

x_0 = الإزاحة الابتدائية عن وضع التوازن، ft (m).

$$\frac{W}{g_c}\frac{d^2x}{dt^2} - kx = 0$$

$$t = \frac{2\pi}{p} \qquad f = \frac{1}{t} = \frac{p}{2\pi} \qquad p = 2\pi f \qquad p = \frac{2\pi}{t}$$

وتأخذ معادلة الحركة الشكل التالي:

$$x = x_0 \cos pt + \frac{v_0}{p} \sin pt$$

التردد الطبيعي

إذا كانت ∂_{ST} تعبر عن إزاحة النابض الناتجة عن الوزن W، عندها $\partial_{ST} = \frac{W}{K}$

وعدد الاهتزازات الحرة خلال 2π ثانية = $\omega_n = \sqrt{\frac{g_c}{\partial_{ST}}}$

وبالتالي سيكون التردد الطبيعي:

$$f_n = 3.14\sqrt{\frac{1}{\partial_{ST}}}\ Hz$$

اهتزاز الفتل

إذا ثبتنا قرصاً، كما في الشكل 2.2، بقضيب مرن وأدرنا القرص بزاوية ابتدائية، عندها سيقوم هذا النظام المرن والمؤلف من القرص والقضيب باهتزاز فتل.

دعنا نفترض:

ϕ = زاوية الفتل للمحور في أي لحظة، rad.

K = مقدار العزم الضروري لتدوير القرص بزاوية مقدارها 1 rad، lbf.ft (N.m)

ω_0 = السرعة الزاوية الابتدائية، rad/s.

ϕ_0 = زاوية الفتل الابتدائية للمحور، rad.

J = عزم العطالة القطبي للقرص (مع إهمال عزم عطالة المحور بالنسبة لعزم عطالة القرص) lbm.ft (N.m).

مع بقاء الرموز p و f و t و g_c كما عرّفناها في الاهتزازات المرنة السابقة. يعطى دور اهتزاز الفتل كما يلي:

$$p = \sqrt{\frac{K}{J}}$$

والتردد:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{Kg_c}{J}}$$

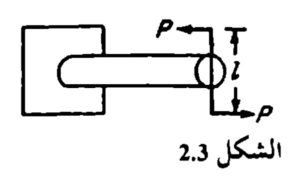
وتأخذ معادلة الحركة الشكل التالي:

$$\phi = \phi_0 \cos pt + \frac{\omega_0}{p} \sin pt$$

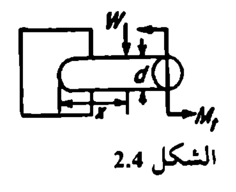
سنتعرض في الفصل الحادي عشر لدراسة الاهتزاز بشكل مفصّل.

الفتل

الفتل في المحاور الدائرية المصمتة



الشكل 2.3



الشكل 2.4

لدينا العلاقة:

$$S_v = \frac{M_t c}{J}$$

حيث:

S_v – إجهاد القص، psi (MPa).

M_t – عزم الفتل – pl، in.lb (N.m).

C – المسافة من المركز وحتى السطح المجهد المأخوذ، in (m).

J – عزم العطالة القطبي للمقطع (mm^4) in^4.

معامل المرونة للقص $G =$ PSI ,

المقطع العرضي	عزم مقاومة الفتل M_t	الانزياح الزاوي, a_1 الطول = 1 in. (25.4 mm), القطر = 1 in. (25.4 mm)		عمل الفتل ($V =$ الحجم)
		بدلالة عزم الفتل	بدلالة اجهاد القص الأعظمي	
d	$\frac{\pi}{16} d^3 S_v$	$\frac{M_t}{GJ} = \frac{32}{\pi d^4} \frac{M_t}{R}$	$2 \frac{S_{v\,max}}{G} \frac{1}{d}$	$\frac{1}{4} \frac{S^2_{v\,max}}{G} V$ (ملاحظة 1)
d, D	$\frac{\pi}{16} \frac{D^4 - d^4}{D} S_v$	$\frac{32}{\pi(D^4 - d^4)} \frac{M_t}{G}$	$2 \frac{S_{v\,max}}{G} \frac{1}{D}$	$\frac{1}{4} \frac{S^2_{v\,max}}{G} \frac{D^2 + d^2}{D^2} V$ (ملاحظة 2)

الجدول 2.2

A, B, h, b	$\frac{\pi}{16} b^2 h S_s$ $(h > b)$	$\frac{16}{\pi} \frac{b^2 + h^2}{b^3 h^3} \frac{M_t}{G}$	$\frac{S_{s\,max}}{G} \frac{b^2 + h^2}{bh^2}$	$\frac{1}{8} \frac{S^2_{s\,max}}{G} \frac{b^2 + h^2}{h^2} V$ (ملاحظة 3)
h, b	$\frac{2}{9} b^2 h S_s$ $(h > b)$	$3.6 \frac{b^2 + h^2}{b^3 h^3} \frac{M_t}{G}$ *	$0.8 \frac{S_{s\,max}}{G} \frac{b^2 + h^2}{bh^2}$ *	$\frac{4}{45} \frac{S^2_{s\,max}}{G} \frac{b^2 + h^2}{h^2} V$ (ملاحظة 4)

الجدول 2.2 /تابع/

المقطع العرضي	عزم مقاومة الفتل M_t	a_1 ,الانرباح الزاوي الطول = 1 in. (25.4 mm), القطر = 1 in. (25.4 mm)		عمل الفتل (الحجم = V)
		بدلالة عزم الفتل	بدلالة اجهاد القص الأعظمي	
$h \times h$	$\frac{2}{9} h^3 S_s$	$7.2 \frac{1}{h^4} \frac{M_t}{G}$	$1.6 \frac{S_{s\,max}}{G} \frac{1}{h}$	$\frac{8}{45} \frac{S^2_{s\,max}}{G} V$ (ملاحظة 5)

الجدول 2.2 /تابع/

الجدول 2.2 /تابع/

b b b	$\frac{b^3}{20} S_v$	$4.62 \frac{1}{b^4} \frac{M_t}{G}$	$2.31 \frac{S_{v_{max}}}{G} \frac{1}{b}$	
b b	$\frac{b^3}{1.09} S_v$	$0.967 \frac{1}{b^4} \frac{M_t}{G}$	$0.9 \frac{S_{v_{max}}}{G} \frac{1}{b}$	

• عندما $h/b =$ 1 2 4 8

العامل 3.6 يصبح $=$ 3.56 3.50 3.35 3.21

العامل 0.8 يصبح $=$ 0.79 0.78 0.74 0.71

الملاحظات : (1) $S_{v_{max}}$ عند الدائرة . (2) $S_{v_{max}}$ عند الدائرة الخارجية (3) $S_{v_{max}}$ عند A; $S_{v_B} = 16M_t/\pi bh^2$.

(4) $S_{v_{max}}$ في منتصف الضلع h; في منتصف b, $S_v = 9M_t/2bh^2$. (5) $S_{v_{max}}$ عند منتصف الضلع

حالتي الفتل والانحناء (للمحاور الدائرية المصمتة):

انظر الشكل 2.4.

$$\sigma_{max} = \frac{16}{\pi d^3}(M_b + \sqrt{M_b^2 + M_t^2})$$

حيث:

σ_{max} = الإجهاد الأعظمي، psi (MPa).

M_t = العزم، in.lb (N.m).

M_b = العزم الناتج عن حمل الانحناء، W_x = in.lb (N.m).

d = قطر القضيب، in (mm).

و

$$M = \frac{\sigma I}{c}$$

حيث:

M = عزم الانحناء، lb.in (N.m).

σ = الإجهاد المرن عند المسافة c من محور التعادل، psi (MPa).

c = المسافة من محور التعادل إلى المستوي الحاوي للإجهاد σ المحسوب، in (m).

I = عزم العطالة لمساحة المقطع حول محور التعادل، in^4 (mm^4).

I/c = معامل المقطع، حيث تمثل c المسافة حتى آخر شريط عنصري (mm^3) in^3.

إجهادات الاسطوانة

الإجهادات في الأنابيب أو الاسطوانات قليلة السماكة (ذات المقاطع الصغيرة)

انظر الشكل 2.4

$$\sigma_h = \frac{pd}{2t} \qquad \sigma_l = \frac{pd}{4t}$$

حيث:

σ_h = الإجهاد الحلقي (المحيطي)، psi (MPa).

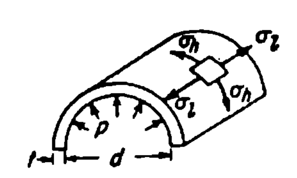
σ_l = الإجهاد الطولي، psi (MPa).

d = القطر الداخلي، in (mm).

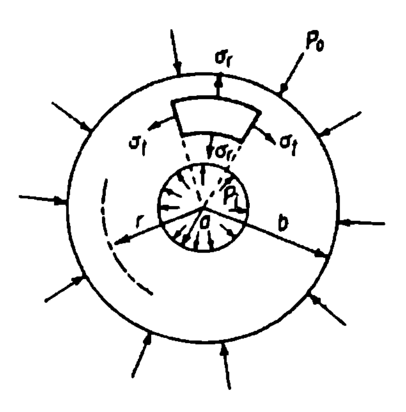
p = الضغط الداخلي، psi (MPa).

t = سماكة جدار الأنبوب، in (mm).

الإجهادات في الأنابيب أو الاسطوانات ذات السماكة الكبيرة



الشكل 2.5




الشكل 2.6

في حال وجود ضغط داخلي فقط:

$$\sigma_r = \frac{a^2 P_i}{b^2 - a^2}\left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right)$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 P_i}{b^2 - a^2}\left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right)$$

في حالة وجود ضغط خارجي فقط:

$$\sigma_r = \frac{P_0 b^2}{b^2 - a^2}\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right)$$

$$\sigma_t = \frac{P_0 b^2}{b^2 - a^2}\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right)$$

حيث:

σ_r = الإجهاد القطري (في الاتجاه القطري)، psi (MPa).

σ_t = الإجهاد المحيطي (في اتجاه المحيط للدائرة المارة بالعنصر المدروس)، psi (MPa).

a = نصف القطر الداخلي للاسطوانة، in (mm).

b = نصف القطر الخارجي للاسطوانة، in (mm).

r = نصف قطر العنصر المدروس، in (mm).

P_i = الضغط الداخلي، psi (MPa).

P_0 = الضغط الخارجي، psi (MPa).

3

معادلات الإجهادات
في العناصر الميكانيكية

الإجهادات الناظمية والأساسية

الإجهادات الناظمية

يمكن تحديد الإجهادات الناظمية الأصغرية والأعظمية - s_n (min)، s_n (max) - والتي هي إجهادات شد أو ضغط وبالحالة العامة لتحميل ثنائي البعد كما يلي:

$$s_n(\max) = \frac{s_x + s_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{s_x - s_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$s_n(\min) = \frac{s_x + s_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{s_x - s_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

تعطي العلاقتان السابقتان القيم الجبرية العظمى والصغرى، حيث:

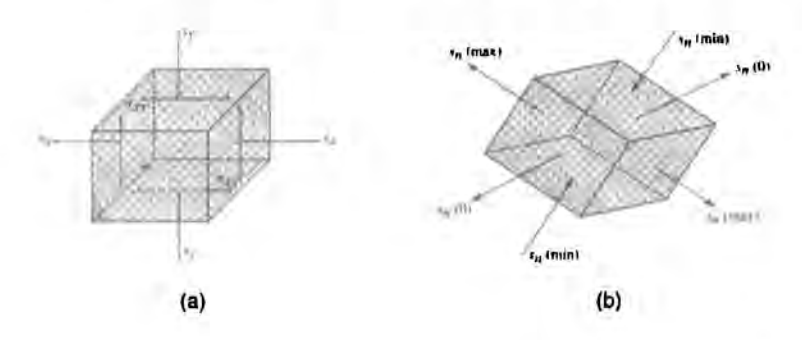
s_x يمثل الإجهاد عند النقطة الحرجة، حيث يمكن أن يؤثر اجهاد شد أو ضغط ناظمي على المقطع المعتبر، والذي يمكن أن ينتج عن حمولات محورية أو حمولات انعطاف أو كليهما. عندما يكون s_x إجهاد شد فيجب أن يسبق بإشارة موجبة (+)، أما إذا كان إجهاد ضغط فسيسبق بإشارة سالبة (-).

s_y يمثل إجهاد في نفس النقطة وفي اتجاه معامد للإجهاد s_x، ويجب أن تسبق هذا الإجهاد أيضاً إشارة جبرية.

τ_{xy} يمثل إجهاد القص عند نفس النقطة الحرجة وهو واقع في المستوي العمودي على المحور y (والذي هو المستوي xz) والمستوي العمودي على المحور x (والذي يمثل المستوي yz). وقد ينتج إنتاج القص هذا عن عزوم الالتواء أو الحمولات العرضية أو حمولات مركبة من كليهما. ويظهر الشكل 3.1a كيفية توضع هذه الإجهادات.

يدعى الإجهادان s_n (max) وs_n (min) بالإجهادين الأساسيين واللذين يتوضعان في مستويين متعامدين يدعان المستويين الأساسيين، ولا يحوي هذان المستويان أي

إجهادات قص. إذا كان هناك تحميل ثنائي البعد فسيكون الإجهاد الرئيسي الثالث معدوماً، ويبين الشكل 3.1b توضع هذه الإجهادات بالنسبة لبعضها البعض.



الشكل 3.1: a) توضع إجهاد القص b) توضع الإجهادات الأساسية.

إجهاد القص الأعظمي

يُحسب إجهاد القص الأعظمي عند النقطة الحرجة على أنه نصف أكبر فرق بين إجهادين أساسيين (مع عدم إهمال أي إجهاد أساسي معدوم). ومن أجل حالة التحميل ثنائي البعد التي تسبب إجهادات ثنائية البعد سيكون لدينا:

$$\tau(\max) = \frac{s_n(\max) - s_n(\min)}{2}$$

أو

$$\frac{s_n(\max) - 0}{2}$$

أو

$$\frac{s_n(\min) - 0}{3}$$

حيث نأخذ النتيجة الأكبر بين النتائج السابقة، ويميل المستوي الحاوي لإجهاد القص الأعظمي بزاوية 45° عن المستويات الرئيسية.

تطبيق

يتطلب تطبيق علاقتي الإجهاد:

$$s_n(\max) = \frac{s_x + s_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{s_x - s_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$s_n(\min) = \frac{s_x + s_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{s_x - s_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

معرفة s_x و s_y و τ_{xy} عند النقطة الحرجة من العنصر الميكانيكي. ونقصد بالنقطة الحرجة تلك النقطة التي ينتج عندها إجهاد مركب أعظمي ناتج عن الحمل المطبق، وإذا كان لدينا قضيب وطبقنا عليه حمولات أدت إلى الإجهادات التالية عند نفس النقطة:

$$s_x \; and \; s_y = \pm \frac{Mc}{I} \pm \frac{P}{A}$$

تذكر بأن هذه الإجهادات يمكن أن تكون سالبة أو موجبة، وذلك اعتماداً على كونها إجهادات شد أو ضغط.

$$\tau_{xy} = \frac{Tr}{J} + s_v$$

تعطى العلاقة السابقة عندما يكون مقطع القضيب دائرياً (وعندما تكون هذه الإجهادات متوازية).

حيث

M – عزم الانحناء، in.lb (N.m).

c – المسافة بين محور التعادل والسطح الخارجي، in (mm).

r – نصف قطر المقطع، in (mm).

I – عزم عطالة المقطع، in^4 (mm^4).

P – الحمل المحوري، Lb (N).

A – مساحة المقطع، in^2 (mm^2).

T – عزم الفتل، in.lb (N.m).

J – عزم العطالة القطبي للمقطع، (mm^4).

s_v – إجهاد القص العرضي، psi (MPa).

$$s_v = \frac{VQ}{Ib}$$

حيث

V – حمولات القص العرضية على المقطع، lb (N).

b – عرض المقطع الحاوي على النقطة الحرجة.

Q – عزم مساحة المقطع للعنصر، فوق أو أعلى النقطة الحرجة، هو مأخوذ بالنسبة لمحور التعادل in^3 (mm^3).

$s_v(\max) = \dfrac{4V}{3A}$ للمقاطع الدائرية ويتوضع وفق محور التعادل.

$s_v(\max) = \dfrac{3V}{2A}$ للمقاطع المستطيلة ويتوضع وفق محور التعادل.

$s_n(\max)$ – الإجهاد الجبري الأعظمي، psi (MPa).

s_n (min) = الإجهاد الجبري الأصغري، psi (MPa).

τ (max) = إجهاد القص الأعظمي، psi (MPa).

الإجهادات الناتجة عن العناصر المتداخلة

يمكن حساب هذه الإجهادات بعد اعتبار الأجزاء المتداخلة هي اسطوانات كبيرة السماكة، كما هو واضح بالشكل 3.2، بالعلاقة التالية:

$$P_c = \frac{\delta}{d_c\left[\frac{d_c^2 + d_i^2}{E_i(d_c^2 - d_i^2)} + \frac{d_o^2 + d_c^2}{E_o(d_o^2 - d_c^2)} - \frac{\mu_i}{E_i} + \frac{\mu_o}{E_o}\right]}$$

حيث:

P_i = الضغط عند سطح التماس، psi (MPa).

δ = التداخل الكلي، in (mm).

d_i = القطر الداخلي للاسطوانة الداخلية، in (mm).

d_c = قطر سطح التماس، in (mm).

d_o = القطر الخارجي للاسطوانة الخارجية، in (mm).

μ_o = نسبة بواسون للاسطوانة الخارجية.

μ_i = نسبة بواسون للاسطوانة الداخلية.

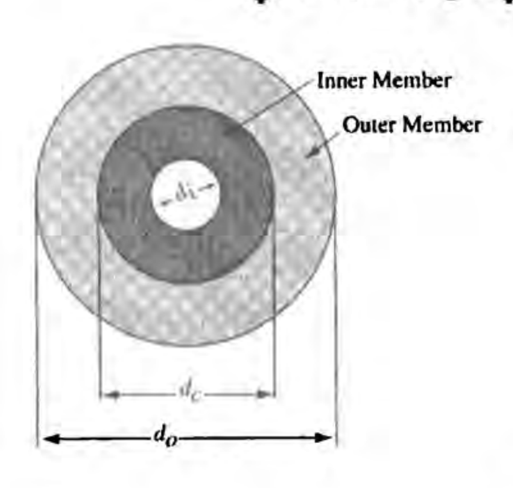
E_o = عامل المرونة للاسطوانة الخارجية، psi (MPa).

E_i = عامل المرونة للاسطوانة الداخلية، psi (MPa).

إذا كانت الاسطوانتان الخارجية والداخلية مصنوعتان من نفس المعدن فيمكن إعادة صياغة المعادلة السابقة لتصبح كما يلي:

$$P_c = \frac{\delta}{2d_c^3(d_o^2 - d_i^2)/[E(d_c^2 - d_i^2)(d_o^2 - d_c^2)]}$$

بعد تحديد P_c فإن الإجهادات المماسية الحقيقية عند السطوح المختلفة والمحددة بمعادلة Lamé، والتي تستخدم في منطقة الاتصال ووفق نظرية الانهيار وفق إجهاد القص الأعظمي يمكن أن تحسب كما يلي:



الشكل 3.2

على السطح الخارجي عند d_o:

$$s_{to} = \frac{2p_c d_c^2}{d_o^2 - d_c^2}$$

على السطح عند d_c ومن جهة الأسطوانة الخارجية:

$$s_{tco} = p_c\left(\frac{d_o^2 + d_c^2}{d_o^2 - d_c^2}\right)$$

على السطح d_c ومن جهة الاسطوانة الداخلية:

$$s_{tci} = -p_c\left(\frac{d_c^2 + d_i^2}{d_c^2 - d_i^2}\right)$$

على السطح الداخلي عند d_i:

$$s_{ti} = \frac{-2p_c d_c^2}{d_c^2 - d_i^2}$$

أما الإجهادات المماسية المكافئة عند السطوح المختلفة والمحسوبة وفق معادلة Birnie، والتي تستخدم في منطقة الاتصال ووفق نظرية الانهيار وفق الانفعال الأعظمي فيمكن حسابها كما يلي:

على السطح الخارجي للاسطوانة الخارجية d_o:

$$s'_{to} = \frac{2p_c d_c^2}{d_o^2 - d_c^2}$$

على السطح d_c من جهة الاسطوانة الخارجية:

$$s'_{tco} = p_c\left(\frac{d_o^2 + d_c^2}{d_o^2 - d_c^2} + \mu_o\right)$$

على السطح d_c ومن جهة الاسطوانة الداخلية:

$$s'_{tci} = -p_c\left(\frac{d_c^2 + d_i^2}{d_c^2 - d_i^2} - \mu_i\right)$$

على السطح الداخلي عند d_i:

$$s'_{ti} = \frac{-2p_c d_c^2}{d_c^2 - d_i^2}$$

القوى والعزوم

تتناسب القوة المحورية العظمى F_a المطلوبة لإنجاز هذا التداخل بشكل طردي مع عدة عوامل منها، سماكة الاسطوانة الخارجية وطولها والفرق بين قطري الاسطوانتين المتداخلتين ومعامل الاحتكاك، ويمكن حساب هذه القوة بقيم تقريبية كما في العلاقة التالية:

$$F_a = f\pi dLp_c$$

ويعطى العزم الذي يمكن نقله عبر هذا التداخل بين الاسطوانتين بدون انزلاق بالعلاقة:

$$T = \frac{fp_c\pi d^2 L}{2}$$

حيث:

F_a – القوة المحورية، lb (N).

T – العزم المنقول، in.lb (N.m).

d – قطر المحور الاسمي، in (mm).

f – معامل الاحتكاك.

L – طول الاسطوانة الخارجية، in (mm).

p_c – ضغط الاتصال بين الاسطوانتين، psi (MPa).

تجميع الأجزاء المتداخلة

يتم التجميع غالباً بتسخين الاسطوانة الخارجية حتى تتمدد على الأقل بمقدار التداخل، ويعطى فرق درجة الحرارة المطلوب لتمديد القطر الداخلي للاسطوانة الخارجية بمقدار δ بالعلاقة:

$$\Delta T = \frac{\delta}{\alpha d_i}$$

حيث:

δ - التداخل القطري، in (mm).

α - معامل التمدد الخطي لكل (°C) °F.

ΔT - التغير في درجة الحرارة، (°C) °F.

d_i - القطر الداخلي للاسطوانة الخارجية قبل التمدد، in (mm).

وبالتوازي مع تسخين الاسطوانة الخارجية يتم تبريد الاسطوانة الداخلية بطرق التبريد المختلفة مثل الجليد الجاف.

معادلات الجوائز

التدلي = D	عزم الانحناء = M	قوة القص = V ردود الفعل = R	المخططات
الحالة 1 : جائز مسند النهايتين، حمل مستمر، موزع بانتظام			
عند المركز : $D_{(max.)} = \frac{5}{384}\,\frac{WL^3}{EI}$ عند X : $D = \frac{Wx}{24\,EIL}\left(L^3 - 2Lx^2 + x^3\right)$	عند المركز: $M_{(max.)} = \frac{WL}{8}$ عند X: $M = \frac{Wx}{2L}\left(L - x\right)$	$R = R_1 = V_{(max.)} = \frac{W}{2}$ عند X : $V = \frac{W}{2} - \frac{Wx}{L}$	L, D, R, R_1, التحميل, M, الانحناء, L-x, V, القص
الحالة 2 : جائز مسند النهايتين، حمل مركز في أي نقطة.			
At x when $x = \sqrt{a(a+2b)/3}$ and $a>b$ $D_{(max.)} = Wab(a+2b)\sqrt{3a(a+2b)} / 27\,EIL$ At x when $x<a$ $D = \frac{Wbx}{6\,EIL}\left[2L(L-x) - b^2 - (L-x)^2\right]$ At x when $x>a$ $D = \frac{Wa(L-x)}{6\,EIL}\left[2Lb - b^2 - (L-x)^2\right]$	عند نقطه التحميل A: $M_{(max.)} = \frac{Wab}{L}$ عند x عندما X>a: $M = \frac{Wbx}{L}$	$R = \frac{Wb}{L}$ $R_1 = \frac{Wa}{L}$ $V_{(max.)} = R$ عندما $a<b$ و R_1 عندما $a>b$ At x: $V = \frac{Wb}{L}$	L, W, a, b, D, R, R_1, x, M, V

الجدول 3.1 معادلات الجوائز

الحالة	العزم	ردود الفعل والقص
الحالة 3 : جائز مسند النهايتين، حملين مركزين غير متساويين وتوزيع غير متساوي	عند نقطة الحمل W: $M = \frac{a}{L}\left[W(L-a) + W_1 b\right]$ عند نقطة تطبيق الحمل W1 : $M_1 = \frac{b}{L}\left[W a + W_1 (L-b)\right]$ عند x عندما $x > a$ أو $< (L-b)$ $M = W\frac{a}{L}(L-x) + W_1\frac{bx}{L}$	$R = \frac{1}{L}\left[W(L-a) + W_1 b\right]$ $R_1 = \frac{1}{L}\left[W a + W_1 (L-b)\right]$ رد الفعل الأعظمي = $V(max.)$ عند x عندما $x > a$ و $< (L-b)$ $V = R - W$
الحالة 4 : جائز مسند النهايتين، بثلاثة أحمال مركزة غير متساوية وتوزيع غير متساوي	عند x عندما $x = a$ $M = Ra$ عند x عندما $x = a_1$ $M_1 = Ra_1 - W(a_1 - a)$ عند x عندما $x = a_2$ $M_2 = Ra_2 - W(a_2 - a) - W_1(a_2 - a_1)$ $M(max.) = M$ عندما $W = R$ or $> R$ $M(max.) = M_1$ عندما $\begin{cases} W_1 + W = R \text{ or } > R \\ W_1 + W_2 = R_1 \text{ or } > R_1 \end{cases}$ $M(max.) = M_2$ عندما $W_2 = R_1$ or $> R_1$	$R = \frac{Wb + W_1 b_1 + W_2 b_2}{L}$ $R_1 = \frac{Wa + W_1 a_1 + W_2 a_2}{L}$ $V(max.) =$ عند x عندما $x > a$ $< a_1$ $V = R - W$ عند x عندما $x > a_1$ and $< a_2$ $V = R - W - W_1$

الجدول 3.1 معادلات الجوائز /تابع/

الحالة			
الحالة 5 : جائز مثبت النهايتين، وبحمل مستمر وبتوزيع منتظم			
عند المركز: $D\,(max.) = \frac{1}{384}\,\frac{WL^3}{EI}$ عند x: $D = \frac{Wx^2}{24\,EIL}\left(L^2 - 2Lx + x^2\right)$	$M\,(max.) = \frac{WL}{24}$ $M_1\,(max.) = \frac{WL}{12}$ $M = \frac{W}{2L}\left(-\frac{L^2}{6} + Lx - x^2\right)$	$R = R_1 = V\,(max.) = \frac{W}{2}$ عند X: $V = \frac{W}{2} - \frac{Wx}{L}$	
الحالة 6 : جائز مثبت النهايتين وبحمل مركز عند أي نقطة			
عند $x = \frac{2aL}{3a+b}$ عندما $a > b$ و $D\,(max.) = \frac{2W\,a^3b^2}{3EI\,(3a+b)^2}$ عندما $x < a$ $D = \frac{W\,b^2x^2}{6\,EIL^3}\left(3aL - 3ax - bx\right)$	عند المسند R: $M_1\left(\frac{max.\ neg.\ mom.}{when\ b > a}\right) = -W\frac{ab^2}{L^2}$ عند المسند R_1: $M_2\left(\frac{max.\ neg.\ mom.}{when\ a > b}\right) = -W\frac{a^2b}{L^2}$ عند نقطة تطبيق الحمل: $M\,(max.) = Ra + M_1 = Ra - W\frac{ab^2}{L^2}$ عند x: $M = Rx - W\frac{ab^2}{L^2}$	$R = W\left(\frac{b^2\,(3a+b)}{L^3}\right)$ $R_1 = W\left(\frac{a^2\,(3b+a)}{L^3}\right)$ $V\,(max.) = R$ عندما $a < b$ $= R_1$ عندما $a > b$ عند x عندما $x < a$ $V = R$	

الجدول 3.1 معادلات الجوائز /تابع/

التدلي = D	عزم الانحناء = M	قوة القص = V ردود الفعل = R	المخططات
الحالة 7 : جائز مثبت من طرف واحد، حمل مستمر وتوزيع منتظم			
عند النهاية الحرة: $D(max.) = \frac{WL^3}{8EI}$ عند x: $D = \frac{W}{24EIL}(x^4 - 4L^3x + 3L^4)$	عند النهاية الثابتة: $M(max.) = \frac{WL}{2}$ عند x: $M = \frac{Wx^2}{2L}$	$R_1 = V(max.) = W$ At x: $V = \frac{Wx}{L}$	L, D, R_1, Loading, Bending, M, V, Shear
الحالة 8: جائز مثبت من طرف واحد، حمل مركز عند أي نقطة			
عند النهاية الحرة: $D(max.) = \frac{WL^3}{6EI}\left[2 - \frac{3a}{L} + \left(\frac{a}{L}\right)^3\right]$ عند نقطة تطبيق القوة: $D = \frac{W}{3EI}(L-a)^3$ عند x عندما $x > a$ $D = \frac{W}{6EI}(-3aL^2 + 2L^3 + x^3 - 3ax^2 - 3L^2x + 6aLx)$	عند النهاية الثابتة: $M(max.) = Wb$ عند x عندما $x > a$ $M = W(x-a)$	$R_1 = V(max.) = W$ عند x عندما $x > a$ $V = W$ عند x عندما $x < a$ $V = 0$	L, W, a, b, D, R_1, M, x, V

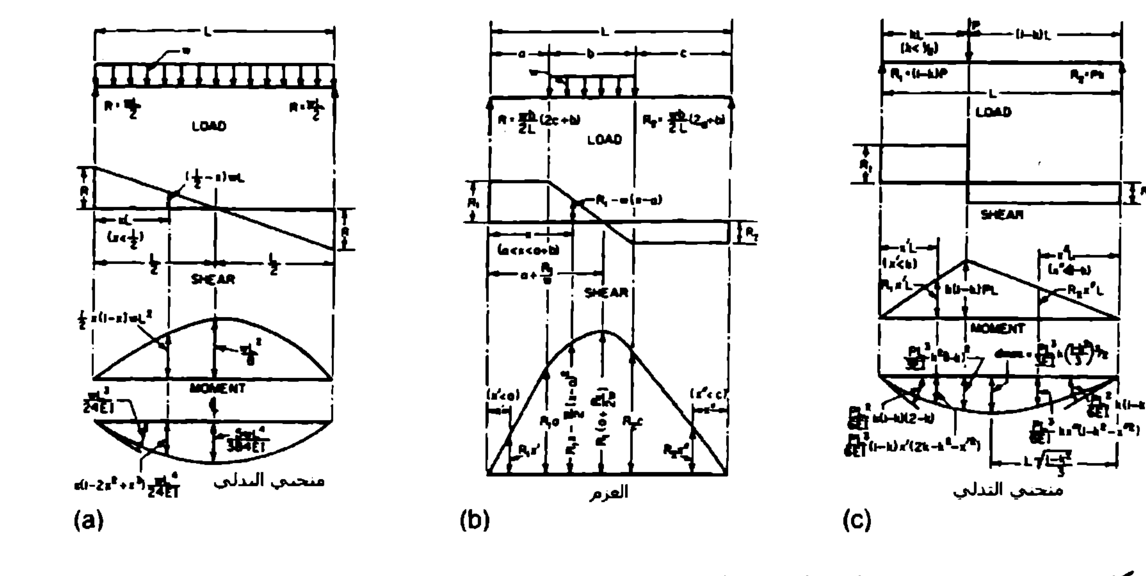
الجدول 3.1 معادلات الجوائز /تابع/

الانحراف	العزم	القوى القاصة وردود الأفعال
الحالة 9: جائز مثبت من طرف ومسند من الطرف الآخر، حمل مركز عند أي نقطة.		
عند x عندما $x = a = .414L$ $D(max) = .0098\frac{WL^3}{EI}$ عند x $x<a$ $D = \frac{1}{6EI}\left[3RL^2x - Rx^3 - 3W(L-a)^2x\right]$ عند x عندما $x>a$ $D = \frac{1}{6EI}\left[R_1(2L^3 - 3L^2x + x^3) - 3Wa(L-x)^2\right]$	عند نقطة تطبيق القوة: $M(max) = Wa\left(\frac{3b^2L - b^3}{2L^3}\right)$ عند النهاية الثابتة: $M_1(max) = WL\left(\frac{3b^2L - b^3}{2L^3}\right) - W(L-a)$ عند x عندما $x<a$ $M = Wx\left(\frac{3b^2L - b^3}{2L^3}\right)$ عند x عندما $x>a$ $M = Wx\left(\frac{3b^2L - b^3}{2L^3}\right) - W(x-a)$	$R = W\left(\frac{3b^2L - b^3}{2L^3}\right)$ $R_1 = W\left(\frac{3aL^2 - a^3}{2L^3}\right)$ x $x<a$ $V = R$ x $x>a$ $V = R - W$
الحالة 10: جائز مثبت من طرف ومسند من الطرف الآخر، حمل مستمر وموزع منتظم		
عند x عندما $x = .4215L$ $D(max) = .0054\frac{WL^3}{EI}$ عند x: $D = \frac{Wx}{48EIL}\left[-3Lx^2 + 2x^3 + L^3\right]$	عند x عندما $x = \frac{3}{8}L$ $M(max) = \frac{9}{128}WL$ عند النهاية الثابتة: $M_1(max) = \frac{1}{8}WL$ عند x: $M = \frac{Wx}{L}\left(\frac{3}{8}L - \frac{1}{2}x\right)$	$R = \frac{3}{8}W$ $R_1 = V(max) = \frac{5}{8}W$ At x: $V = \frac{3}{8}W - \frac{Wx}{L}$

الجدول 3.1 معادلات الجوائز /تابع/

الانحراف	العزم	القص وردود الأفعال	المخطط
الحالة 11 : جائز بنهايتين بارزتين، توضع غير متناظر، حمل مستمر وموزع منتظم			
	عند x_1: عندما $x_1 = \frac{R}{w} - a$ $M(max.) = R\left(\frac{R}{2w} - a\right)$ عند R: $M_1 = \frac{1}{2} wa^2$ عند R_1: $M_1 = \frac{1}{2} wb^2$ عند x: عندما $x < a$ $M = \frac{1}{2} w(a-x)^2$ عند x_1: عندما $x_1 < L$ $M = \frac{1}{2} w(a+x_1)^2 - Rx_1$ عند x_2: عندما $x_2 < b$ $M = \frac{1}{2} w(b-x_2)^2$	الحمل لكل واحدة طول $= w = \frac{W}{a+L+b}$ $R = w\left[(a+L)^2 - b^2\right] \div 2L$ $R_1 = w\left[(b+L)^2 - a^2\right] \div 2L$ $V(max.) = wa \quad R - wa$ x: when $x < a$ $V = w(a-x)$ x_1: when $x_1 < L$ $V = R - w(a+x_1)$ x_2: when $x_2 < b$ $V = w(b-x_2)$	
الحالة 12 : جائز بنهايتين بارزتين، توضع مناظر، مع حملين مركزين متساويين عند النهايتين			
عند النهايتين الحرتين: $D = \frac{Wa^2(3L+2a)}{12EI}$ عند المركز : $D = \frac{WaL^2}{16EI}$	عند x_1: عندما $x_1 < L$ $M(max.) = \frac{Wa}{2}$ عند x: عندما $x < a$ $M = \frac{W}{2}(a-x)$	$R = R_1 = V(max.) = \frac{W}{2}$ عند x: عندما $x < a$ $V = \frac{W}{2}$	

الجدول 3.1 معادلات الجوائز /تابع/

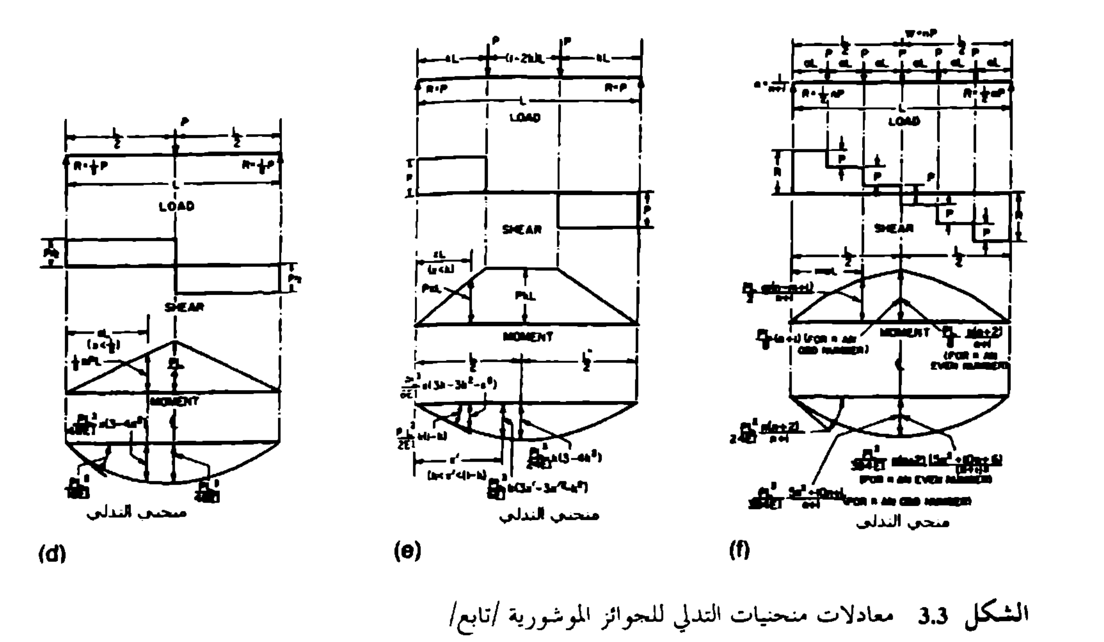


الشكل 3.3 معادلات منحنيات التدلي للجوائز الموشورية

a) التدلي والعزم والقص لجائز موشوري بنهايتين مسندتين وبحمل منتظم على كامل الجائز.

b) القص والعزم لجائز موشوري بنهايتين مسندتين وبحمل منتظم على جزء من الجائز.

c) التدلي والعزم والقص لجائز موشوري بنهايتين مسندتين وبحمل مركز على أي نقطة.

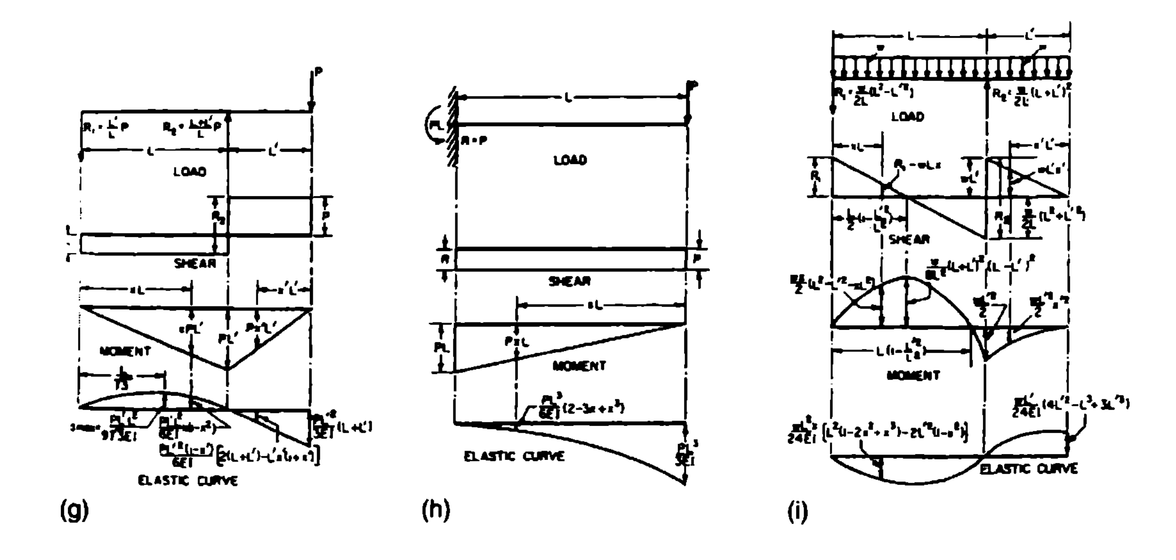


الشكل 3.3 معادلات منحنيات التدلي للجوائز الموشورية /تابع/

d) التدلي والعزم والقص لجائز بسيط الاسناد وبحمل مركز في منتصف الجائز.

e) التدلي والعزم والقص لجائز بسيط الاسناد مع حملين مركزين متساويين.

f) التدلي والعزم والقص لجائز بسيط الاسناد مع عدة أحمال متساوية تفصل بينها مسافات متساوية.

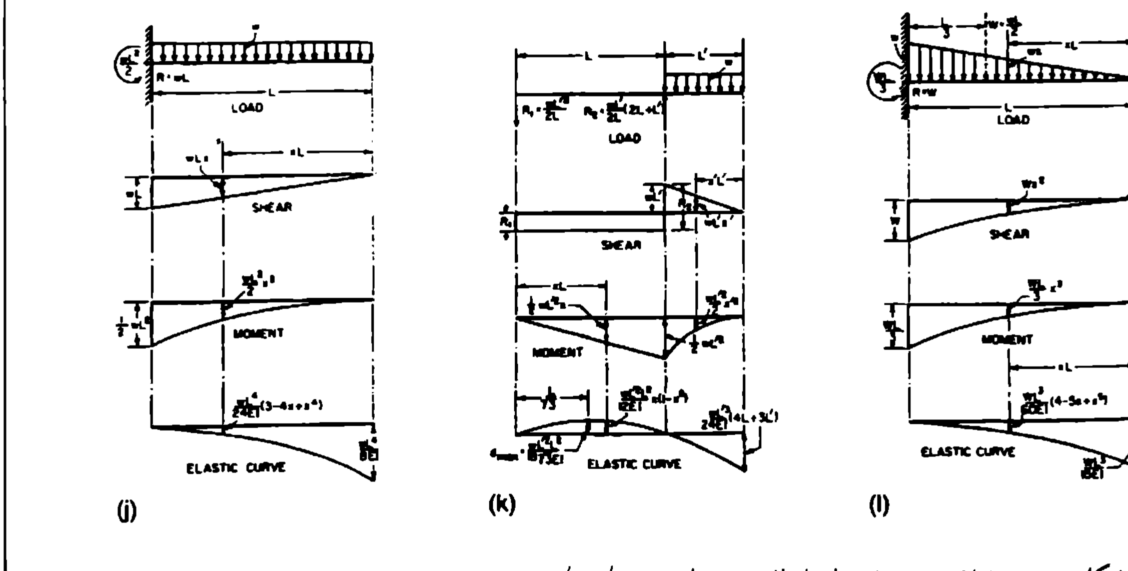


الشكل 3.3 معادلات منحنيات التدلي للجوائز الموشورية /تابع/

g) التدلي والعزم والقص لجائز ذو نهاية بارزة عليها حمل مركز.

h) التدلي والعزم والقص لجائز مثبت من طرف واحد وحمولة مركزه على طرفه الحر.

i) التدلي والعزم والقص لجائز بارز النهاية وعليه حمولة منتظمة موزعة على كامل طوله.

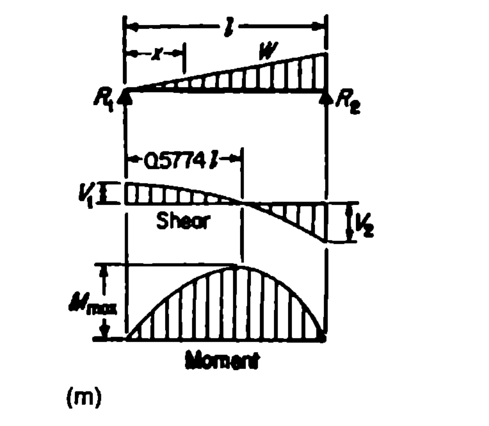


الشكل 3.3 معادلات منحنيات التدلي للجوائز الموشورية /تابع/

j) التدلي والعزم والقص لجائز مثبت من طرفه وعليه حمولة موزعة بانتظام على كامل طوله.

k) التدلي والعزم والقص لجائز بنهاية بارزة عليها حمولة موزعة بانتظام.

l) التدلي والعزم والقص لجائز بنهاية موثوقة وعليه حمولة موزعة على شكل مثلث.



$$R_1 = V_1 = \frac{W}{3}$$

$$R_2 = V_{2_{max}} = \frac{2W}{3}$$

$$V_x = \frac{W}{3} - \frac{Wx^2}{l^2}$$

$$M_{max}\left(\text{at } x = \frac{l}{\sqrt{3}} = .5774l\right) = \frac{2Wl}{9\sqrt{3}} = .1283Wl$$

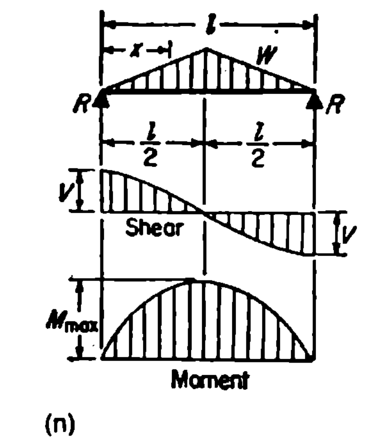
$$M_x = \frac{Wx}{3l^2}(l^2 - x^2)$$

$$\Delta_{max}\left(\text{at } x = l\sqrt{1 - \sqrt{\frac{8}{15}}} = .5193l\right) = .01304\frac{Wl^3}{EI}$$

$$\Delta_x = \frac{Wx}{180EIl^2}(3x^4 - 10l^2x^2 + 7l^4)$$

الشكل 3.3 معادلات منحنيات التدلي للجوائز الموشورية /تابع/

m) جائز بسيط الاسناد مع حمولة تزداد بانتظام من نهاية للنهاية الأخرى.



$$R = V = \frac{W}{2}$$

$$V_x \left(\text{when } x < \frac{l}{2}\right) = \frac{W}{2l^2}(l^2 - 4x^2)$$

$$M_{max} \text{ (at center)} = \frac{Wl}{6}$$

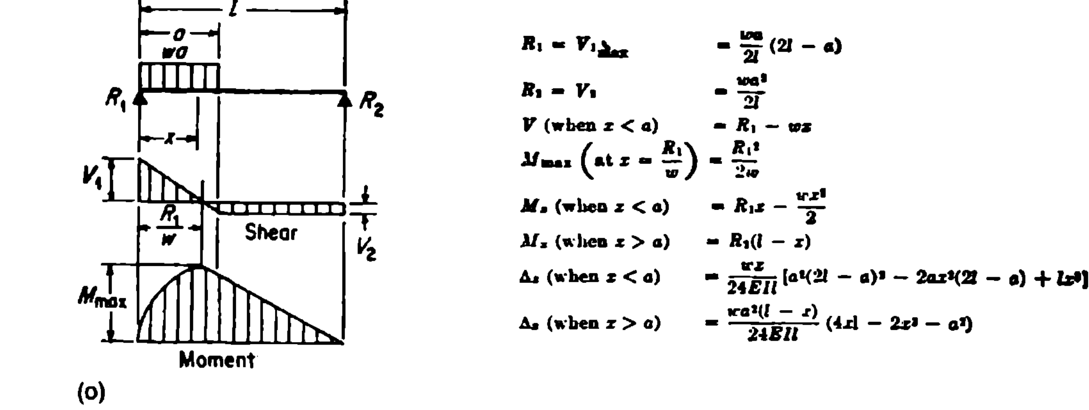
$$M_x \left(\text{when } x < \frac{l}{2}\right) = Wx\left(\frac{1}{2} - \frac{2x^2}{3l^2}\right)$$

$$\Delta_{max} \text{ (at center)} = \frac{Wl^3}{60EI}$$

$$\Delta_x = \frac{Wx}{480EI\,l^2}(5l^2 - 4x^2)^2$$

الشكل 3.3 معادلات منحنيات التدلي للجوائز الموشورية /تابع/

n) جائز بسيط الاسناد مع حمولة تزداد بانتظام من النهايتين إلى المركز.



$$R_1 = V_{1\,max} = \frac{wa}{2l}(2l - a)$$

$$R_2 = V_2 = \frac{wa^2}{2l}$$

$$V \text{ (when } x < a) = R_1 - wx$$

$$M_{max}\left(\text{at } x = \frac{R_1}{w}\right) = \frac{R_1^2}{2w}$$

$$M_x \text{ (when } x < a) = R_1 x - \frac{wx^2}{2}$$

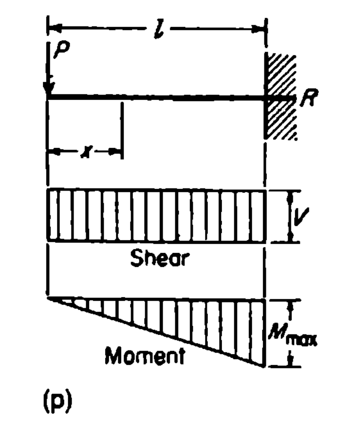
$$M_x \text{ (when } x > a) = R_2(l - x)$$

$$\Delta_x \text{ (when } x < a) = \frac{wx}{24EIl}[a^2(2l - a)^2 - 2ax^2(2l - a) + lx^3]$$

$$\Delta_x \text{ (when } x > a) = \frac{wa^2(l - x)}{24EIl}(4xl - 2x^2 - a^2)$$

الشكل 3.3 معادلات منحنيات التدلي للجوائز الموشورية /تابع/

o) جائز بسيط الاسناد مع حمولة منتظمة جزئية متوضعة على إحدى نهايتيه.



$R = V = P$

M_{max} (عند النهاية الثابتة) $= Pl$

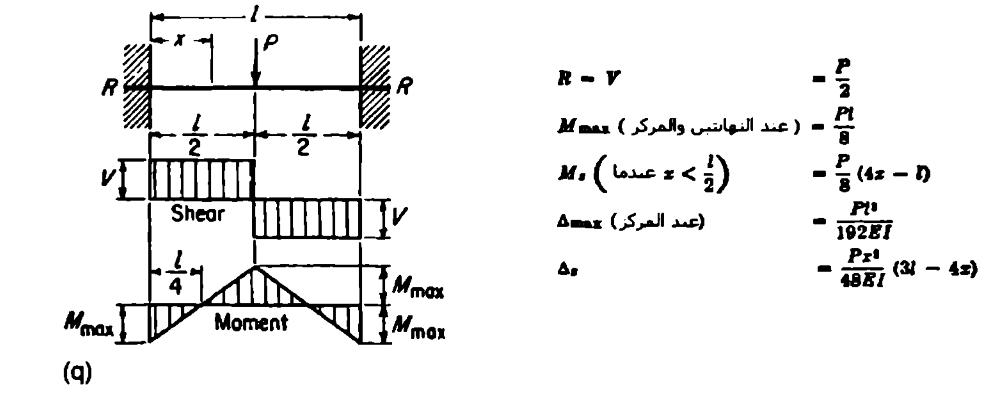
$M_x = Px$

Δ_{max} (عند النهاية الحرة) $= \frac{Pl^3}{3EI}$

$\Delta_x = \frac{P}{6EI}(2l^3 - 3l^2x + x^3)$

الشكل 3.3 معادلات منحنيات التدلي للجوائز الموشورية /تابع/

p) جائز موثوق من طرف، مع حمولة مركزة على نهايته الحرة.



$R = V = \frac{P}{2}$

M_{max} (عند النهايتين والمركز) $= \frac{Pl}{8}$

M_x (عندما $x < \frac{l}{2}$) $= \frac{P}{8}(4x - l)$

Δ_{max} (عند المركز) $= \frac{Pl^3}{192EI}$

$\Delta_x = \frac{Px^2}{48EI}(3l - 4x)$

الشكل 3.3 معادلات منحنيات التدلي للجوائز الموشورية /تابع/

q) جائز موثوق النهايتين مع حمولة مركزة في المنتصف.

سنورد الآن جدولاً يبين الثوابت الفيزيائية لبعض المعادن المشهورة:

الجدول 3.2

المعدن	معامل المرونة، $E \times 10^{-3}$		معامل الجساءة، $G \times 10^{-3}$		نسبة بواسون، μ	الكثافة kg/m^3
	MN/m^2	(kgf/mm^2)	MN/m^2	(kgf/mm^2)		
Aluminium (خلائط)	71.0	(7.24)	26.2	(2.67)	0.334	2730
Beryllium	287.1	(29.28)	-		-	1820
Beryllium copper	124.2	(12.66)	48.3	(4.92)	0.285	8230
Brass	95.1	(9.70)	34.3	(3.50)	0.30 - 0.40	8450
Bronze	109.0	(11.10)	-		-	8730
Carbon steel	202.0	(20.60)	78.5	(8.00)	0.292	7820
Cast Iron, gray	100.0	(10.20)	41.4	(4.22)	0.211	7200
Copper	120.6	(12.30)	38.3	(3.90)	0.260	8960
Inconel	214.0	(21.80)	76.0	(7.75)	0.290	8960
Lead	15.7	(1.60)	7.5	(0.76)	0.450	11340
Megnesium	44.8	(4.57)	16.6	(1.69)	0.350	1800
Molybdenum	331.0	(33.75)	117.2	(11.95)	0.307	10200
Monel metal	179.3	(18.28)	65.6	(6.68)	0.320	8830
Nickel silver	127.5	(13.00)	48.3	(4.92)	0.322	8690
Nickel steel	196.1	(20.00)	75.6	(7.80)	0.291	7750
Phosphor bronze	111.0	(11.32)	41.4	(4.22)	0.349	8160
Stainless steel (18 - 8)	190.3	(19.40)	73.1	(7.45)	0.305	7750
Titanium	103.5	(10.55)	-		-	4480
Tungsten	437.3	(41.53)	173.6	(17.70)	0.170	19300
Zirconium	68.4	(6.97)	-		-	6500

الجدول 3.3 عامل الوثوقية (عامل الأمان)

المتسلسل	التفصيل	عامل الأمان R
1	عندما يتم التحكم بالأبعاد النهائية واختبارها أثناء الإنتاج، ويتم شراء المعادن بحيث تكون خصائصها دقيقة جداً مثل حالة تصميم الطائرات وعربات الفضاء	1.0
2	إذا ضمنا تجارة عالية الوثوقية للمعادن، وعندما نستطيع تحديد الحمولات والإجهادات بشكل دقيق واستخدام قانون دقيق للتصميم.	1.1 إلى 1.5
3	لنفس اعتبارات البند الثاني، إلا أن قانون التصميم غير صارم أو دقيق	1.5 إلى 2.0
4	للمعادن العادية، وإذا كان من المحتمل زيادة الحمل، والوثوقية أو الأمان هام جداً	2.0 إلى 3.0
5	للعناصر المصنوعة من حديد الزهر أو حديد الصب (Cast iron)، وإذا كانت الحمولات غير محددة في التصميم، وإذا لم نستطع تحديد الإجهادات بدقة	3 فما فوق
6	في حالة التصميم الميكانيكي للعناصر المصنوعة من الفولاذ أو الألمنيوم	1.25 إلى 1.5
7	إذا كانت المواد (من الفولاذ أو الألمنيوم) ليست من النوعية الجيدة، أو إذا لم تكن هناك معلومات حول جودتها.	2.00

الجدول 3.4 اللدونة في حالة الشد

المعدن	حد المرونة σ MN/m^2 (kgf/mm^2)	معامل المرونة E × 10^{-3} MN/m^2 (kgf/mm^2)	معامل اللدونة u mJ/mm^3 (mm kgf/mm^3)	قوة الصدم (عدد Izod)
حديد (CAST IRON) الصب أو حديد الزهر				
Class 20 (عادي) ..	43.2* (4.40)	68.7 (7.00)	0.215 (0.022)	
Class 25 ..	68.7* (7.00)	89.2 (9.10)	0.430 (0.044)	
Nickel, Grade II ..	118.0* (12.00)	124.5 (12.70)	0.905 (0.092)	
Malleable ..	138.3 (14.10)	172.6 (17.60)	0.905 (0.092)	7.9
Aluminium alloy, SAE 33 ..	48.1 (4.90)	66.7 (6.80)	0.280 (0.029)	
Brass, SAE 40 or SAE 41 ..	68.7 (7.00)	82.4 (8.40)	0.452 (0.046)	2.7
Bronze, SAE 43 ..	193.2 (19.70)	110.8 (11.30)	2.770 (0.282)	
MONEL METAL				
دلفنة على الساخن ..	206.0 (21.10)	176.5 (18.00)	2.000 (0.203)	120
دلفنة على البارد، مطبّع ..	482.5 (49.20)	176.5 (18.00)	10.850 (1.106)	110
فولاذ (STEEL)				
SAE 1010 ..	207.0 (21.10)	207.0 (21.10)	1.695 (0.173)	
SAE 1030 ..	252.0 (25.70)	207.0 (21.10)	2.490 (0.254)	20
SAE 1050, annealed مُلدَّن ..	334.4 (34.10)	206.0 (21.00)	4.290 (0.438)	
SAE 1095, annealed مُلدَّن ..	414.0 (42.20)	206.0 (21.00)	6.780 (0.691)	

المعدن	حد المرونة σ MN/m^2 (kgf/mm^2)	معامل المرونة $E \times 10^{-3}$ MN/m^2 (kgf/mm^2)	معامل اللدونة u mJ/mm^3 ($mm\ kgf/mm^3$)	قوة الصدم (عدد Izod)
SAE 1095, tempered مراجع	516.8 (52.70)	206.0 (21.00)	10.620 (1.083)	
SAE 2320, annealed مُلدَّن ..	310.0 (31.60)	206.0 (21.00)	3.840 (0.392)	52
SAE 2320, tempered مراجع..	690.0 (70.30)	206.0 (21.00)	18.870 (1.924)	40
SAE 3250, annealed مُلدَّن ..	552.0 (56.25)	214.0 (21.80)	21.810 (2.224)	
SAE 3250, tempered مراجع..	1383.0 (141.00)	214.0 (21.80)	72.880 (7.431)	30
SAE 6150, annealed مُلدَّن ..	427.6 (43.60)	214.0 (21.00)	7.005 (0.714)	
SAE 6150, tempered مراجع..	1100.0 (112.50)	214.0 (21.80)	52.650 (5.369)	
مطاط (Rubber) ..	2.1 (0.21)	1.0×10^{-3} (0.11×10^{-3})	33.900 (3.456)	

* ليس هناك تحديد دقيق لحد المرونة لحديد الزهر، ولكن يمكننا استخدام القيمة الموضوعة بكل أمان.

4

المحاور ومعادلاتها

المحاور وأعمدة الإدارة

إذا تعرض المحور لعزم أو فتل، فسيتولد داخله إجهاد قص. ويتغير إجهاد القص هذا من القيمة صفر عند محور المحور إلى قيمة أعظمية عند السطح الخارجي أو أقصى ليف. وتعطى العلاقة بين العزم T ((pound-inches (KN.m وإجهاد القص الأعظمي s ((psi (MPa كما يلي:

$$T = s\frac{J}{c}$$

حيث

J هو عزم العطالة القطبي لمقطع المحور، (mm^4) in^4.

c يمثل المسافة من محور التعادل إلى أقصى ليف.

ومن أجل المحور الدائري المصمت فإن c تساوي نصف قطر المحور و:

$$J = \frac{\pi D^4}{32}$$

حيث يمثل D قطر المحور وبالتالي:

$$s_s = \frac{TD/2}{\pi D^4/32} = \frac{5.1T}{D^3}$$

وإذا كان المحور مفرغ فإن:

$$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32}$$

حيث

d – نصف القطر الداخلي، وبالتالي:

$$s_s = \frac{5.1TD}{D^4 - d^4}$$

وإذا أردت اختيار قطر المحور المصمت بعد معرفة العزم تستطيع استخدام العلاقة:

$$D = 1.72\sqrt[3]{\frac{T}{s}}$$

حيث

s – إجهاد التصميم لمادة المحور، وإذا كانت لدينا الاستطاعة بالحصان البخاري وسرعة دوران المحور معروفة، فنستطيع عندها حساب قطر المحور من العلاقة:

$$D = 68.5\sqrt[3]{\frac{H}{ns}}$$

وتستخدم للمحور المفرغ المعرض للفتل فقط المعادلة التالية:

$$\frac{T}{s} = \frac{D^3(1-q^4)}{5.10}$$

حيث

q – النسبة بين القطر الداخلي والقطر الخارجي وبالتالي:

$$D = 1.72\sqrt[3]{\frac{T}{s(1-q^4)}}$$

الانحراف الزاوي الناتج عن العزم

عندما يقوم المحور بنقل عزم من طرف لآخر، فإنه سيحدث هناك دوران للمحور (الشكل 4.1). وتعطى الزاوية الكلية للدوران بالدرجات ومن أجل محور دائري مصمت بمقطع نظامي بالعلاقة:

$$\theta = \frac{584LT}{GD^4}$$

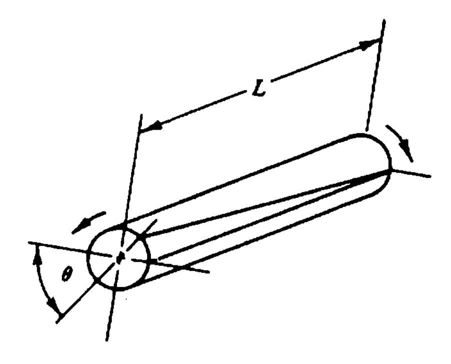
وإذا كان المحور مفرغ:

$$\theta = \frac{584LT}{G(D^4 - d^4)}$$

حيث

L = طول المحور، in (mm).

G = معامل الجساءة، psi (MPa).



الشكل 4.1 الانحراف الزاوي الناتج عن تطبيق عزم على محور آلة

المحاور في حالة الانحناء

إذا تمّ تطبيق عزم انحناء فقط على محور فإنه سيعامل كجائز. وإذا تعرض محور دائري مصمت لعزم انحناء M ‏pound-inches (KN.m)، فيعطى عندها الإجهاد الأعظمي، psi (MPa)، بالعلاقة:

$$s_t = \frac{32M}{\pi D^3}$$

ومن أجل محور مفرغ:

$$s_t = \frac{32M}{\pi D^3}\frac{1}{1-C^4}$$

حيث:

$$C = \frac{d}{D}$$

المحاور المعرضة لعزم انحناء وفتل مركبين

لا تتعرض المحاور الناقلة للقدرة بواسطة السيور والمسننات والسلاسل إلى عزوم فتل فقط وإنما تتعرض لعزوم انحناء أيضاً. ولحساب تأثير الأحمال المركبة يتم استخدام نظرية إجهاد القص الأعظمي للمعادن المطيلية، واستخدام نظرية الإجهاد الناظمي الأعظمي للمعادن القصفة.

ومن أجل الإجهاد الناظمي الأعظمي:

$$s_{t,\max} = \frac{s_t}{2} + \sqrt{s_s^2 + \frac{s_t^2}{4}}$$

حيث:

$s_{t,max}$ = الإجهاد الناظمي الأعظمي، psi (MPa).

s_t = إجهاد الشد، psi (MPa).

s_s = إجهاد القص، psi (MPa).

ومن أجل نظرية إجهاد القص الأعظمي:

$$s_{s,\max} = \sqrt{s_s^2 + \frac{s_t^2}{4}}$$

حيث:

$s_{s,\max}$ = إجهاد القص الأعظمي، psi (MPa). ولذلك ومن أجل المحاور الدائرية المقطع المصمتة تصبح المعادلة كما يلي:

$$s_{s,\max} = \frac{5.1}{D^3}\sqrt{T^2 + M^2}$$

حيث

T = عزم الفتل lb.in (KN.m).

M = عزم الانحناء lb.in (KN.m).

ومن أجل المحاور المفرغة الدائرية المقطع:

$$s_{s,\max} = \frac{5.1}{D^3}\sqrt{T^2 + M^2}\,\frac{1}{1-C^4}$$

ويعطى إجهاد الشد الأعظمي الناتج عن الحمل المركب وفق نظرية الإجهاد الناظمي الأعظمي بالعلاقة:

$$s_{t,\max} = \frac{s_t}{2} + \sqrt{s_s^2 + \frac{s_t^2}{4}}$$

والتي تصبح من أجل المحاور دائرية المقطع المصمتة:

$$s_{t,\max} = \frac{5.1}{D^3}(M + \sqrt{T^2 + M^2})$$

ومن أجل المحاور المفرغة دائرية المقطع:

$$s_{t,\max} = \frac{5.1}{D^3}\left(M + \sqrt{T^2 + M^2}\right)\left(\frac{1}{1 - C^4}\right)$$

يشير الحد $\sqrt{T^2 + M^2}$ غالباً إلى عزم اللي المكافئ، والذي يُعرَّف كعزم فتل خيالي (غير حقيقي) والذي يحرِّض (أو يعطي) نفس إجهاد القص في المحور كعزم مركب من عزم فتل فعلي وعزم انحناء فعلي.

وإذا تعرضت المحاور لحمولات مفاجئة فيجب ضرب العزم T و M بعامل من 1.5 إلى 2.0، اعتماداً على كبر الحمل المفاجئ المطبّق، وتستخدم القيم الأعلى من أجل الحمولات الأكبر.

محاور نقل القدرة

تصنع المحاور من المعادن المطيلية وتصمم اعتماداً على المتانة باستخدام نظرية القص الأعظمي، ونفرض في المعادلات الآتية بأن المحاور مصنوعة من المعادن المطيلية وذات مقاطع دائرية. تتعرض محاور نقل القدرة عادة لحمولات فتل وانحناء وحمولات محورية. ويعطى إجهاد عزم الفتل τ_{xy} لحمولات عزوم الفتل كما يلي:

$$\tau_{xy}=\begin{cases}\dfrac{M_t r}{J}=\dfrac{16M_t}{\pi d^3} & \text{للمحاور المصمتة}\\[2ex] \dfrac{16M_t d_o}{\pi(d_o^4-d_i^4)} & \text{للمحاور المفرغة}\end{cases}$$

ومن أجل حمولات الانحناء يعطى إجهاد عزم الانحناء s_b (شد أو ضغط) كما يلي:

$$s_b=\begin{cases}\dfrac{M_b r}{J}=\dfrac{16M_b}{\pi d^3} & \text{للمحاور المصمتة}\\[2ex] \dfrac{32M_b d_o}{\pi(d_o^4-d_i^4)} & \text{للمحاور المفرغة}\end{cases}$$

ويعطى إجهاد الشد أو الضغط من أجل الحمولات المحورية كما يلي:

$$s_a=\begin{cases}\dfrac{4F_a}{\pi d^2} & \text{للمحاور المصمتة}\\[2ex] \dfrac{4F_a}{\pi(d_o^2-d_i^2)} & \text{للمحاور المفرغة}\end{cases}$$

وتعطى صيغة معادلة ASME للمحاور المفرغة التي تتعرض لحمولات فتل وانحناء وحمولات محورية عبر تطبيق معادلة إجهاد القص الأعظمي المعدّلة بإدخال عوامل الصدم والتعب والأعمدة كما يلي:

$$d_o^3=\frac{16}{\pi s_s(1-K^4)}\sqrt{\left[K_b M_b+\frac{\alpha F_a d_o(1+K^2)}{8}\right]^2+(K_t M_t)^2}$$

وتختزل صيغة معادلة ASME بالنسبة للمحاور المصمتة ذات الحمولات المحورية الخفيفة أو المعدومة كما يلي:

$$d^3 = \frac{16}{\pi s_s}\sqrt{(K_b M_b)^2 + (K_t M_t)^2}$$

حيث وعند المقطع المختار لدينا:

τ_{xy} = إجهاد قص عزم الفتل، psi (MPa).

M_t = عزم الفتل، in.lb(KN.m).

M_b = عزم الانحناء، in.lb(KN.m).

d_o = قطر المحور الخارجي، in (mm).

d_i = قطر المحور الداخلي، in (mm).

F_o = الحمل المحوري (القوة المحورية)، lb (KN).

$$K = \frac{d_i}{d_o}$$

K_b = عامل حد الصدم والتعب المركب المطبق عبر عزم الانحناء (الانعطاف).

K_t = عامل حد الصدم والتعب المركب المطبق عبر عزم الفتل.

وتعطى قيم عاملي حد الصدم والتعب المركب المطبق عبر عزمي الفتل والانحناء في الجدول التالي:

الجدول 1.4

	K_b	K_t
للمحاور الثابتة:		
تطبيق الحمل بالتدريج	1.0	1.0
تطبيق الحمل بشكل مفاجئ	1.5 - 2.0	1.5 - 2.0
للمحاور الدوارة:		
تطبيق الحمل بالتدريج	1.5	1.0
تطبيق الحمل بشكل مفاجئ (صدمة خفيفة)	1.5 - 2.0	1.0 - 1.5
تطبيق الحمل بشكل مفاجئ (صدمة شديدة)	2.0 - 3.0	1.5 - 3.0

S_b = الإجهاد الناتج عن عزم الانحناء (شد أو ضغط)، psi (MPa).

S_a = الإجهاد الناتج عن القوة المحورية (الحمل المحوري) (شد أو ضغط)، psi (MPa).

تخصص صيغة معادلة ASME للأعمدة المصنوعة في الفولاذ التجاري.

للمحاور غير الحاوية على مجاري خوابير S_s (المسموح به) = 8000 psi

للمحاور الحاوية على مجاري خوابير S_s (المسموح به) = 6000 psi

S_s (الإجهاد المسموح به) = 30 % من حد المرونة ولكن ليس أعلى من 18 % من المتانة العظمى في حالة الشد للمحاور بدون مجاري خوابير، وتخفض هذه القيمة بنسبة 25 % في حالة وجود مجاري خوابير.

α = عامل توضع العمود، ويعتبر عامل توضع العمود واحدي من أجل حمولة الشد، أما من أجل حمولات الضغط فيمكن حساب α من المعادلة التالية:

$$\alpha = \begin{cases} \dfrac{1}{1-0.0044(L/k)} & \text{من أجل} \quad \dfrac{L}{k} < 115 \\ \dfrac{s_y}{\pi^2 nE}\left(\dfrac{L}{k}\right)^2 & \text{من أجل} \quad \dfrac{L}{k} > 115 \end{cases}$$

$$n = \begin{cases} 1 & \text{من أجل نهايتين بارزتين} \\ 2.25 & \text{من أجل نهايتين مثبتتين} \\ 1.6 & \text{من أجل نهايتين مقيدتين جزئياً كما في حالة المدحرجات} \end{cases}$$

K = نصف قطر الدوران = $\sqrt{\frac{I}{A}}$، in (mm).

I = عزم العطالة، in^4 (mm^4).

A = مساحة مقطع المحور، in^2 (mm^2).

S_y = إجهاد حد الخضوع في حالة الضغط، psi (MPa).

جساءة الفتل

يعتمد تصميم المحاور وفق جساءة الفتل على زاوية الفتل المسموح بها، وتعتمد زاوية الفتل المسموح بها بدورها على التطبيق العملي، وتتغير بحوالي 0.08 درجة لكل قدم (0.3 m)، من أجل المحاور المستخدمة في آلات التشغيل، حوالي 1.0° لكل قدم (0.3 m) من أجل أعمدة المناولة العلوية:

$$\theta = \begin{cases} \dfrac{584 M_t L}{G(d_0^4 - d_i^4)} & \text{للمحاور ذات المقاطع الدائرة المفرغة} \\ \dfrac{584 M_t L}{G d^4} & \text{للمحاور ذات المقاطع الدائرية المصمتة} \end{cases}$$

حيث

θ - زاوية الفتل، deg.

L - طول المحور، in (mm).

M_t - عزم الفتل، in.lb (KN.m).

G - معامل المرونة لعزم الفتل (MPa).

d - قطر المحور، in (mm).

الجساءة الجانبية

يعتمد تصميم المحاور وفق الجساءة الجانبية على الإزاحة العرضية المسموح بها لحاوية المدحرج العامل، وعلى دقة أداء آلة التشغيل، وعلى الأداء المرضي للمسنن، وعلى توضع المحور، ومتطلبات مشابهة أخرى. وتحدد قيمة الإزاحة عبر إجراء التكامل مرتين للعلاقة:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M_b}{EI}$$

حيث

M_b - عزم الانحناء (الانعطاف)، in.lb (KN.m).

E - معامل المرونة، psi (MPa).

I - عزم العطالة، in^4 (mm^4).

إذا كان المحور مؤلف من مقاطع مختلفة فنقوم عملياً بإجراء حل بياني للمعادلة السابقة.

العزوم

يعتبر عزمي الفتل والانحناء هما العاملين الرئيسيين المؤثرين على تصميم المحور، وتكمن الخطوة الأولى في عملية تصميم المحور في رسم مخطط عزم الانحناء للمحور المحمّل، أو مخطط عزم الانحناء المركب إذا كانت الحمولات المؤثرة على المحور واقعة في أكثر من مستوٍ، وعندها يمكن تحديد النقاط ذات إجهاد الانحناء الحرج من مخطط العزم.

يمكن تحديد عزم الفتل المؤثر على المحور من العلاقة التالية:

$$M_t = \frac{hp \times 33{,}000 \times 12}{2, \pi \, rpm} = \frac{63{,}000 \times hp}{rpm} \qquad in.lb\,(kN.m)$$

ويحدد العزم عند استخدام القيادة بالسيور بالعلاقة:

$$M_t = (T_1 - T_2)R \qquad in.lb\,(kN.m)$$

حيث

T_1 = قوة الشد على الجانب المشدود من القشاط (السير) على البكرة، lb (KN).

T_2 = قوة الشد على الجانب غير المشدود من القشاط على البكرة، lb (KN).

R = نصف قطر البكرة، in (mm).

ومن أجل القيادة بالمسننات يحدد العزم كما يلي:

$$M_t = F_t \, R$$

حيث F_t = القوى المماسية على نصف القطر الخطوي، lb (KN).

R = نصف القطر الخطوي، in (mm).

السرعة الحرجة

عندما يكون المحور خاضع لحمل مركز متوضع على أي نقطة من طوله، نستطيع تحديد السرعة الحرجة له بالعلاقة:

$$N_c = \frac{188}{\sqrt{Y}}$$

حيث

N_c = السرعة الحرجة، rpm.

Y = انحراف المحور، in (mm).

ويتم إيجاد انحراف المحور عبر استخدام طرق القضبان.

إذا كان المحور مصنوعاً من الفولاذ وذو مقطع دائري مصمت ومسند بواسطة مدحرجين قليلي السماكة أو بمدحرجات ذات تراصف تلقائي فتصبح معادلة السرعة الحرجة كما يلي:

$$N_c = 387{,}000\frac{D^2}{ab}\sqrt{\frac{L}{P}}$$

حيث

D = القطر (mm) in.

L = المسافة بين مدحرجات الإسناد، (mm) in.

P = الحمل، (Kg) lb.

a و b هما المسافة بين الحمل والمدحرجين، (mm) in.

إذا كان المحور مثبت بشكل جاسيء بمدحرجات طويلة:

$$N_c = 387{,}000\frac{D^2L}{ab}\sqrt{\frac{L}{Pab}}$$

وحتى نستطيع تطبيق هذه المعادلات يجب أن يكون المحور ذو قطر منتظم والأكتاف والنتوءات صغيرة بحيث يمكن إهمالها، وإذا كان وزن المحور صغير نسبياً فيمكن إهماله عادةً، وإذا أردنا إدخاله فنقوم بإضافة نصف الوزن إلى الحمل المطبق.

ويجب أن لا تزيد سرعة عمل المحور الأعظمية عن 80 % من السرعة الحرجة.

وتعطى السرعة الحرجة للمحاور ذات المقاطع الثابتة والمسندة إسناداً بسيطاً عند نهايتيها، مع عدم وجود كتلة مضافة إلى كتلة المحور نفسه بالعلاقة التالية:

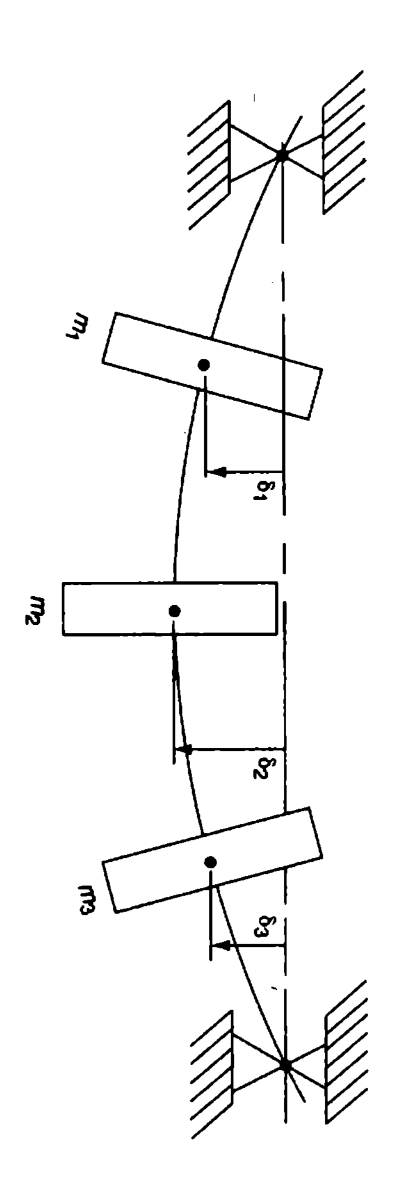
$$\omega_c = \sqrt{\frac{5}{4}\frac{g}{\delta(\max)}} \quad \text{rad/unit time}$$

$\delta_{(\max)}$ تمثل الانحراف الستاتيكي الأعظمي الناتج عن الحمل الموزع بانتظام والمساوي لوزن المحور.

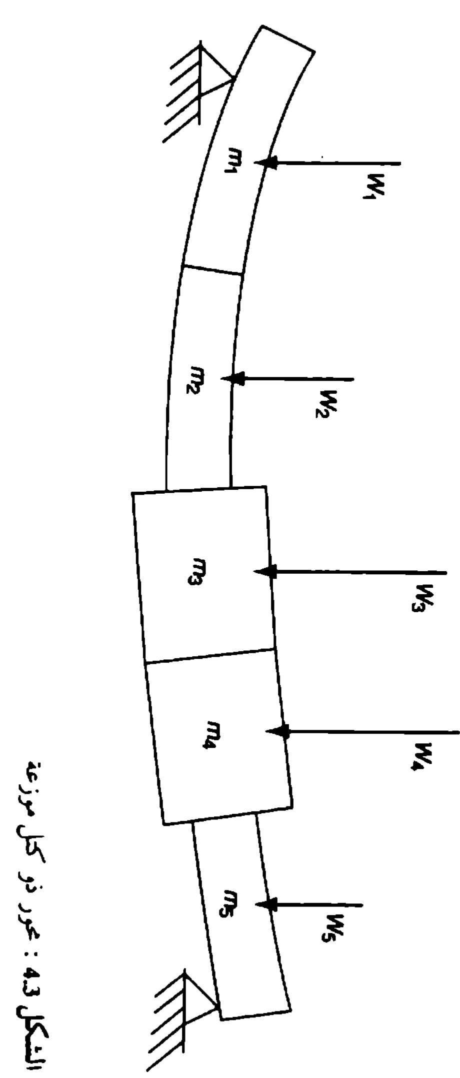
g يمثل ثابت الجاذبية ($386\ in/s^2$ أو $32.2\ ft/s^2$).

ومن أجل محور مهمل الكتلة يحمل عدة كتل مركزة (انظر الشكل 4.2) تعطى السرعة الحدية الأولى بشكل تقريبي بالعلاقة:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g\sum_{1}^{j} W_n\delta_n}{\sum_{1}^{j} W_n\delta_n^2}} \qquad \text{Rayleigh – Ritz} \quad \text{معادلة}$$



الشكل 4.2 : محور مهمل الكتلة يحمل عدة كتل مركزة



الشكل 4.3 : محور ذو كل موزعة

حيث

W_n = وزن الكتلة n.

δ_n = التدلي الستاتيكي عند الكتلة n.

j = العدد الكلي للكتل.

يمكن استخدام نفس المعادلة لتقدير السرعة الحدية الأولى لمحور ذو كتلة موزعة.

(راجع الشكل 4.3). حيث قمنا بتقسيم الكتلة الموزعة إلى عدد من القطع m_1 وm_2 وm_3 الخ. مركزين كل كتلة منتظمة في مركز ثقلها.

تُعطى معادلة Dunkerley والتي هي تقريب آخر للسرعة الحدية الأولى لنظام متعدد الكتل كما يلي:

$$\frac{1}{\omega_c^2} = \frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} + \frac{1}{\omega_3^2} + \ldots \quad \text{Dunkerley معادلة}$$

حيث تمثل

ω_c السرعة الحدية الأولى لنظام متعدد الكتل.

ω_1 السرعة الحدية فيما لو كانت الكتلة 1 موجودة فقط.

ω_2 السرعة الحدية فيما لو كانت الكتلة 2 موجودة لوحدها فقط. الخ.

إن من المفيد أن نذكر بأن معادلتي Rayleigh-Ritz وDunkerley هما معادلتان تقريبيتان للتردد الطبيعي الأول للاهتزاز، والذي من المفترض أن يكون قريباً من السرعة الحدية الأولى للدوران. وبشكل عام تزيد معادلة Rayleigh-Ritz من تقدير التردد الطبيعي، بينما معادلة Dunkerley تبخس من تقدير التردد الطبيعي.

المعادلات التجريبية لمحاور نقل القدرة المصنوعة من الفولاذ

تستخدم عدة معادلات تجريبية لمحاور نقل القدرة المصنوعة من الفولاذ، وتحوي معظمها على واحد أو أكثر من عوامل تجريبية.

من أجل المحاور المصمتة:

D - القطر الخارجي للمحور، in (mm).

T - عزم الفتل الأعظمي، in.lb (N.m).

B - عزم الانحناء الأعظمي، in.lb (N.m).

K_t - عامل الخدمة ويطبق على العزم T، يتراوح بين 1.0 و2.0.

K_b - عامل الخدمة ويطبق على العزم B، يتراوح بين 1.0 و2.5.

π - ثابت، 3.1416.

hp - الاستطاعة المنقولة (KW).

R - دورة في الدقيقة.

S - إجهاد العمل المسموح به، psi (MPa).

ويحسب قطر المحور المعرّض لعزم مركب من عزم انحناء وعزم فتل بالعلاقة:

$$D = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi Sc}\sqrt{(K_t T)^2 + (K_b B)^2}}$$

أو

$$\sqrt[3]{\frac{16}{\pi Sc}\sqrt{\left(\frac{396,000 K_t hp}{2\pi R}\right)^2 + (K_b B)^2}}$$

ومن أجل حمولة عزم انحناء فقط:

$$D = \sqrt[3]{\frac{32K_bB}{\pi S_b}} \qquad K_bB = \frac{\pi}{32}S_bD^3 = 0.09817S_bD^3$$

ومن أجل حمولة عزم فتل فقط:

$$D = \sqrt[3]{\frac{321{,}000K_t hp}{S_t R}} \qquad K_tT = 0.1963S_tD^3$$

$$K_t(hp) = \frac{S_tD^3R}{321{,}000}$$

ومن أجل المحاور المفرغة المكافئة، قم بإيجاد القطر D للمحور المصمت واضربه بالقيمة $1/\sqrt[3]{1-K^4}$ لإيجاد القطر الخارجي للمحور المفرّغ المكافئ لأي نسبة تصميم K، حيث يمثل D_1 القطر الداخلي للمحور المفرغ وK نسبة القطر الداخلي إلى القطر الخارجي = $\frac{D_1}{D}$.

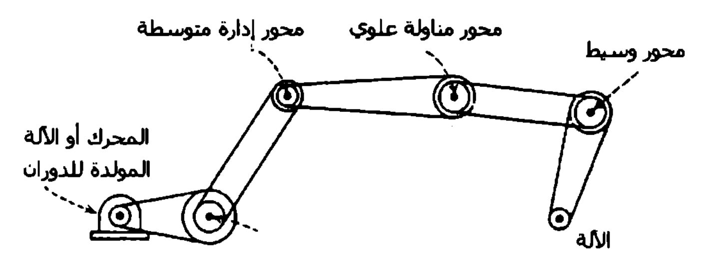
الأنظمة ذات محاور نقل القدرة المتعددة

يبين الشكل 4.4 أسماء وتوضع المحاور المختلفة المستخدمة في نظام متعدد المحاور المقاد عبر السيور أو السلاسل أو كليهما.

المحاور القائدة

الموضع: أول محور من جهة المحرك أو الآلة المولّدة للدوران.

السرعات: يتراوح المجال الصناعي من 25 إلى 550 دورة بالدقيقة.



الشكل 4.4 : نظام يستخدم محاور نقل قدرة متعددة

المعادلة:

$$hp = \frac{D^3 R}{125}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{125 \times hp}{R}}$$

حيث

hp = الاستطاعة، (KW).

D = قطر المحور، in (mm).

R = سرعة الدوران، rpm.

125 = ثابت للإجهاد الفعلي الآمن الناتج عن عزم مركب من عزم فتل وانحناء وهو 2800 psi (19.3 MPa).

محاور المناولة العلوية

التوضع: يمكن أن تكون أول محور بعد المحرك أو أول محور أو ثاني محور من المحاور القائدة.

السرعات: يتراوح المجال الصناعي لهذه المحاور بين 70 إلى 400 rpm.

المعادلة:

$$hp = \frac{D^3R}{100}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{100 \times hp}{R}}$$

حيث

hp = الاستطاعة (KW).

D = قطر المحور، in (mm).

R = سرعة الدوران، rpm.

100 = ثابت للإجهاد الفعلي الآمن الناتج عن عزم مركب من عزم الفتل والانحناء وهو 3200 psi (22.1 MPa).

محاور إدارة متوسطة

التوضع: إما بين المحاور القائدة ومحاور المناولة العلوية، أو بين محاور المناولة العلوية والمحاور الوسيطة.

السرعات: يتراوح المجال الصناعي لسرع هذه المحاور بين 100 و400 rpm.

المعادلة: نفس المعادلة لمحاور المناولة العلوية.

المحاور الوسيطة

التوضع: تتوضع عادةً بين محاور المناولة العلوية والجزء الدوار من الآلة.

السرعات: يتراوح المجال الصناعي لسرع هذه المحاور بين 100 و600 rpm.

المعادلة: من أجل تحميل وعمل متوسطين:

$$hp = \frac{D^3 R}{80}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{80 \times hp}{R}}$$

حيث

hp – الاستطاعة (KW).

D – قطر المحور، in (mm).

R – سرعة الدوران، rpm.

80 – ثابت للإجهاد الفعلي الآمن الناتج عن عزم مركب من عزم فتل وانحناء بقيمة 3600 psi (24.8 MPa).

يعطي الجدول التالي معادلات زاوية الدوران الناتجة عن الفتل θ للمحاور ذات المقاطع المختلفة:

الجدول 4.2 : المعادلات المعبرة عن زاوية الفتل الناتجة عن العزم كتابعة للمقطع

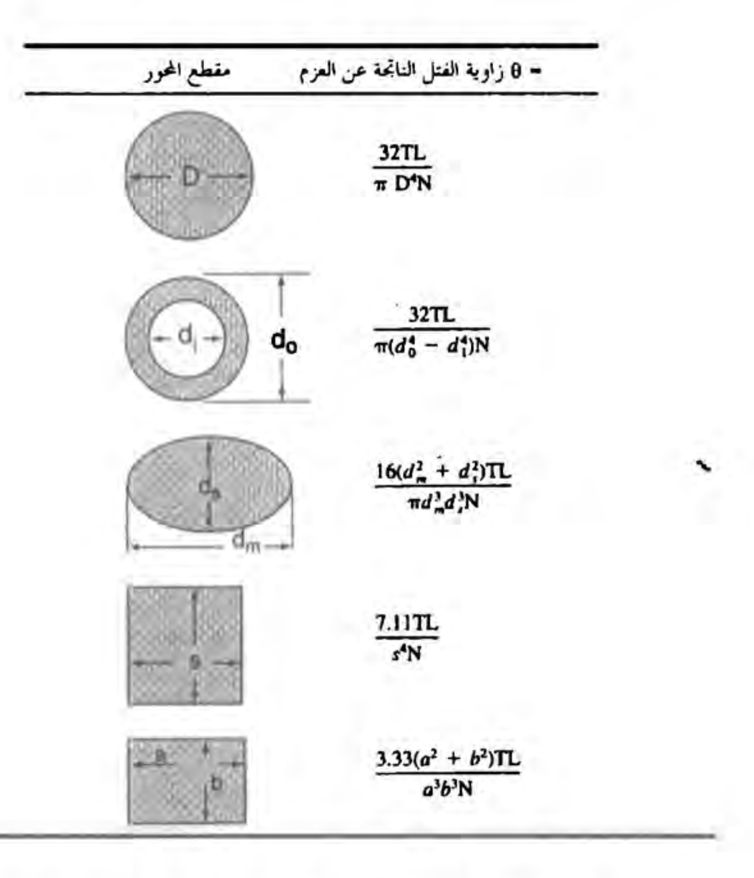
θ – زاوية الفتل، راديان

T – عزم الفتل، in.lb (N.m)

L – طول المحور، in (mm)

N – معامل الجساءة psi (MPa)

D، d_o، d_i، d_m، d_s، s، a، b – أبعاد مقاطع المحور، in (mm)



مقطع المحور	θ = زاوية الفتل الناتجة عن العزم
D	$\frac{32TL}{\pi D^4 N}$
d_i، d_o	$\frac{32TL}{\pi(d_0^4 - d_i^4)N}$
d_n، d_m	$\frac{16(d_m^2 + d_n^2)TL}{\pi d_m^3 d_n^3 N}$
s	$\frac{7.11TL}{s^4 N}$
a، b	$\frac{3.33(a^2 + b^2)TL}{a^3 b^3 N}$

بينما يعطي الجدول التالي معادلات عزم الفتل للمحور مع مواضع إجهاد القص الأعظمي في المحور.

الجدول 4.3 : معادلات عزم الفتل للمحاور ومواضع اجهاد القص الأعظمي في كل محور

معادلات عزم الفتل= T	موضع إجهاز القص الأعظمي	مقطع المحور
$\frac{\pi D^3 f}{16}$	أبعد ليف	D
$\frac{\frac{\pi}{16}(d_o^4 - d_i^4)}{d_o} f$	أبعد ليف	d_i d_o
$\frac{\pi d_m d_s^2 f}{16}$	نهايتي المحور الرئيسي	d_s d_m
$0.208 S^3 f$	منتصف الأضلاع	S
$\frac{A^2 B^2 f}{3A + 1.8B}$	نقطة منتصف الضلع الرئيسي	A B

ملاحظة : f هي إجهاد القص الأعظمي psi (MPa).

الحدافات على المحاور (الدولاب المعدّل)

تنتج بعض مصادر الاستطاعة – مثل محركات الاحتراق الداخلي – القدرة خلال جزء صغير من دورتها. لذلك تستخدم الحدافات (الدواليب المعدّلة) لتنعيم خرج هذه التقلبات وجعل تدفق القدرة أكثر انتظاماً.

تعطى الطاقة الحركية (KE) للحدافات كما يلي:

$$KE = \frac{Wv^2}{2g}$$

حيث

KE = الطاقة الحركية، ft.lb (KN.m).

W = وزن الحدافة، lb (Kg).

v = سرعة مركز الكتلة، ft/s (m/s).

g = ثابت الجاذبية الأرضية، ft/s^2 (m/s^2).

يعتمد التغير المقبول في السرعة الزاوية على المنشأة أو التطبيق الذي ستوضع فيه الحدافة، ويستخدم عامل التنظيم لتحديد قيمة (أو مجال) تغير السرعة الزاوية، والذي يعطى كما يلي:

$$C_f = \frac{v_1 - v_2}{v}$$

حيث

C_f = عامل التنظيم.

$$\Delta KE = \frac{WC_f v^2}{g}$$

إذا كانت سماكة الإطار مهملة بالنسبة للقطر (كما هو في الحالة المعتادة) فيمكن اعتبار مركز الإطار هو مركز الكتلة.

ويؤخذ تسارع الجاذبية الأرضية عادة بقيمة 32.2.

$$W = \frac{32.2\Delta KE}{C_f v^2}$$

حيث

W = وزن الإطار، lb (Kg).

v = متوسط سرعة مركز الإطار ft/s (m/s).

المحاور العمودية الخاصة بالمزج أو أوعية الخلط

معادلة الاستطاعة بالحصان البخاري

الاستطاعة المطلوبة = $\frac{WV^2}{550G}$

حيث

W = الوزن الكلي المراد خلطه أو مزجه.

V = السرعة، ft/s (تشكل القطر الرئيسي للمحراك).

G = ثابت الجاذبية الأرضية أو 32.2.

لاحظ بأن: الاستطاعة بالحصان البخاري KW = 0.746 × (hp).

وسنورد الآن جدولاً بخواص المواد التي تصنع منها المحاور:

المعدن	نسبة الكربون	المتانة القصوى (MN/m^2) (kgf/mm^2)			حد المرونة MN/m^2 (kgf/mm^2)			نسبة الاستطالة
	،	شد	ضغط	قص	شد	ضغط	قص	
دلفنة تجارية على البارد	0.10-0.25	482.0 (49.2)	482.0 (49.2)	241.0 (24.6)	241.0 (24.6)	241.0 (24.6)	122.5 (12.5)	35
خراطة تجارية	0.10-0.25	412.0 (42.0)	412.0 (42.0)	206.0 (21.0)	206.0 (21.0)	206.0 (21.0)	103.0 (10.5)	35
دلفنة أو تشكيل على الساخن	0.15-0.25	451.0 (46.0)	451.0 (46.0)	225.0 (23.0)	245.0 (25.0)	245.0 (25.0)	113.0 (11.5)	26
	0.25-0.35	482.0 (49.2)	482.0 (49.2)	241.0 (24.6)	275.0 (28.0)	275.0 (28.0)	121.0 (12.3)	24
	0.35-0.45	520.0 (53.0)	520.0 (53.0)	260.0 (26.5)	314.0 (32.0)	314.0 (32.0)	130.0 (13.2)	22
	0.45-0.55	553.0 (56.4)	553.0 (56.4)	276.5 (28.2)	345.0 (35.2)	345.0 (35.2)	138.0 (14.1)	20
Nickel ... $3\frac{1}{2}$%	0.15-0.25	588.0 (60.0)	588.0 (60.0)	294.0 (30.0)	382.0 (39.0)	382.0 (39.0)	147.0 (15.0)	26
Chrome Vanadium ...	0.25-0.35	620.0 (63.2)	620.0 (63.2)	310.0 (31.6)	414.0 (42.2)	414.0 (42.2)	155.0 (15.8)	25

الجدول 4.4 : خواص مواد المحاور

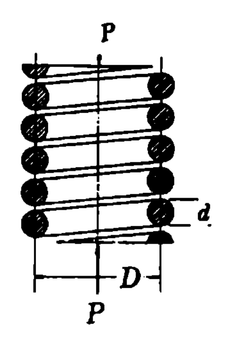
5

عناصر الآلات ومعادلات الوثوقية

النوابض

النوابض الحلزونية

من أجل نوابض الشد أو الضغط الحلزونية:



الشكل 5.1 : نابض ضغط حلزوني

$$\tau = \frac{8PD}{\pi d^3}$$

$$P = \frac{\pi d^3 \tau}{8D}$$

$$\delta = \frac{8PD^3 n}{Gd^4}$$

$$\delta = \frac{\pi D^3 n\tau}{Gd}$$

$$P = \frac{Gd^4 \delta}{8D^3 n}$$

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{Gd^4}{8D^3 n}$$

$$\tau = K_\tau = \frac{8PDK}{\pi d^3}$$

$$\tau' = K\tau = \frac{8PDK}{\pi d^3}$$

$$K = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0.615}{c}$$

$c = \frac{D}{d} =$ دليل النابض

حيث:

P = الحمل على النابض.

d, D = قطري السلك واللفات.

δ = الانحراف.

τ = إجهاد القص غير المصحح.

τ' = K τ = إجهاد القص المصحح.

K = عامل تصحيح الانحناء (يعطى في المراجع الهندسية).

n = عدد اللفات الفعالة في النابض.

$k = \frac{P}{\delta}$ = صلابة النابض.

ومـــن أجل نوابض الضغط ذات النهايات الممنوعة من الالتفاف أثناء الانحراف، يعطى التمدد في القطر خلال الانضغاط من الحالة الحرة إلى الارتفاع الصلب كما يلي:

$$\Delta D = 0.05 \frac{p^2 - d^2}{D}$$

حيث

P = الخطوة – أو المسافة من المركز إلى المركز – عند الارتفاع الحر، وإذا كانت النهايتين حرتين في الالتفاف يصبح التمدد في القطر كما يلي:

$$\Delta D = 0.10\frac{p^2 - 0.8pd - 0.2d^2}{D}$$

التحميل الجانبي لنوابض الضغط

تتعـــرض النوابض الحلزونية – وخاصة تلك التي تستخدم كعازلات اهتزاز – إلى تحميل جانبي بقوة F أثناء انضغاطها بقوة عمودية P، وتصبح في هذه الحالة المقاومة الوحيدة للتحميل الجانبي هي صلابة النابض (الشكل 5.2).

ومـــن أجـــل الـــنوابض الفـــولاذية ذات الأســـلاك الدائرية المقطع – وإذا كان $E = 30 \times 10^6$ psi (206.9 GPa) و$G = 11.5 \times 10^6$ psi (79.3 GPa) – تعطـــى الصلابة k_x في الاتجاه العرضي بالمعادلة:

$$k_x = \frac{F}{\delta_x} = \frac{10^6 d^4}{C_1 nD(0.204h_s^2 + 0.265D^2)}$$

حيث

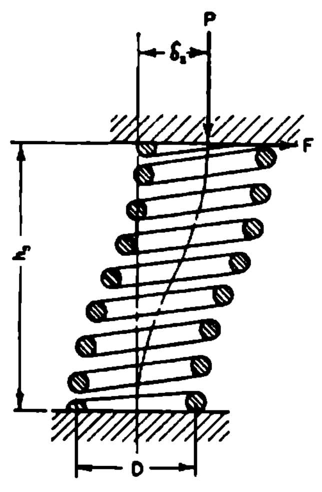
δ_x = الانحراف الجانبي الناتج عن القوة F.

l_o = الطول الحر.

h_s = مقدار انضغاط النابض = δ_{st} - .

δ_{st} = الانحراف الشاقولي الناتج عن الحمل P.

C_l = عامل يعتمد على النسبتين $\frac{\delta_{st}}{l_o}$ و $\frac{l_o}{D}$، وتؤخذ قيم هذا العامل من مخططات موجودة في المراجع الهندسية.



الشكل 5.2 : نابض خاضع لحمل مركب عمودي وجانبي (احدى نهايتيه مثبتة والثانية مقادة (موجهة)).

تعطى نسبة الصلابة المحورية $k_y = P/\delta_{st}$ إلى الصلابة الجانبية k_x للنوابض الفولاذية ذات الأسلاك الدائرية المقطع حيث $E = 30 \times 10^6$ psi (206.9 GPa) و$G = 11.5 \times 10^6$ psi (79.3 GPa) بالعلاقة التالية:

$$\frac{k_y}{k_x} = 1.44 C_l \left(0.204 \frac{h^2}{D^2} + 0.265 \right)$$

وتصلح هذه المعادلة أن تطبق على النوابض المصنوعة من مواد أخرى تملك النسبة $\frac{E}{G}$ مساوية تقريباً 2.6.

الترددات الطبيعية: يعطى التردد الطبيعي f_n مقدراً بدورة كل ثانية أو بالهرتز (Hz) للنوابض الحلزونية المحصورة بين صفيحتين متوازيتين بالعلاقة:

$$f_n = \frac{2d}{\pi D^2 n}\sqrt{\frac{Gg}{32\gamma}}$$

حيث

n = عدد اللفات الفعالة.

g = تسارع الجاذبية الأرضية.

وتصـــبح هـــذه المعادلة من أجل النوابض الفولاذية مقموطتي النهاية وتملك $G = 11.5 \times 10^6$ psi (79.3 GPa) و$\gamma = 0.285$ lb/in³ (0.008 Kg/cm³) بالشـــكل التالي:

$$f_n = \frac{14{,}000d}{D^2 n}$$

وتكون ترددات الأنماط الأعلى للاهتزاز عبارة عن الأمثال 2 و3 و4... الخ من هذا التردد.

تأثير الصدم: إذا تعرضت إحدى نهايتي نابض حلزوني طويل مسبق الضغط أو حر لانضـــغاطٍ مفاجـــئ عبر كتلة ثقيلة متحركة بسرعة v، فستحدث عندها موجة اندفاع منتشرة على طول سلك النابض بسرعة v_s، حيث:

$$v_s = \frac{d}{D}\sqrt{\frac{gG}{2\gamma}}$$

ومن أجل فولاذ يملك $G = 11.5 \times 10^6$ psi (79.3 GPa) و$g = 386$ in/s (980.4 cm/s).

$$\gamma = 0.283\ \text{lb/in}^3\ (7833\ \text{kg/m}^3)$$

$$v_s = \frac{88{,}560d}{D} \quad in/s\,(cm/s)$$

ويعطى الزمن اللازم لانتشار هذه الموجة على كامل طول سلك النابض بالعلاقة:

$$t_s = \frac{\pi n D}{v_s}s$$

وتعطى الزيادة في إجهاد القص غير المصحح $\Delta\tau$، عندما تتعرض إحدى نهايتي نابض طويل لانضغاط مفاجئ بسرعة v بالعلاقة:

$$\Delta\tau = v\sqrt{\frac{2\gamma G}{g}}$$

ومن أجل النوابض الفولاذية التي تملك $G = 11.5 \times 10^6$ psi (79.3 GPa) و $\gamma = 0.285\ \text{lb/in}^3\ (7888\ \text{Kg/m}^3)$.

$$\Delta\tau = 130\ v$$

حيث تعطى السرعة v بالإنش لكل ثانية (cm/s) و$\Delta\tau$ (MPa) psi. مما يعني بأن $\Delta\tau$ لا تتعلق بأبعاد النابض.

وتعطى الزيادة المطابقة في الحمل ΔP والانحراف لكل لفة $\Delta\delta$ بالعلاقتين:

$$\Delta P = \frac{\pi v d^3}{8D}\sqrt{\frac{2\gamma G}{g}}$$

$$\Delta\delta = \frac{\pi v D^2}{d}\sqrt{\frac{2\gamma}{gG}}$$

ومن أجل النوابض الفولاذية، وعندما تعطى ΔP بواحدات (N) lb، وΔδ بواحدات in (cm) والسرعة v بواحدات in/s (cm/s) تصبح كما يلي:

$$\Delta P = \frac{51 d^3 v}{D}$$

$$\Delta\delta = \frac{D^2 v}{d}(35.5 \times 10^{-6})$$

نوابض الشد الحلزونية

تعطـــى المعـــادلات التقريبية لنوابض الشد ذات نصف حلقة معدّلة لتشكل نهاية الوشيعة (الشكل 5.3) بالشكل:

عند الانحناء عند $A' = \frac{PD}{2}$

حيث

D - قطر اللفة الوسطي.

وإجهاد الانحناء الاسمي عند $A' = \frac{16PD}{\pi d^3}$

حيث

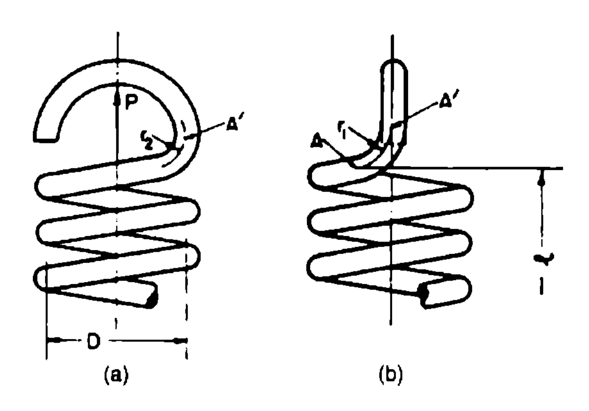
d - قطر السلك.

وإجهاد الشد الاسمي الناتج عن عزم الفتل $\frac{8pD}{\pi d^3}$.

ويعطى إجهاد الانحناء الأعظمي σ عند النقطة 'A (عند بداية الانحناء) بالعلاقة:

$$\sigma = \frac{16PD}{\pi d^3}K_1 + \frac{4P}{\pi d^2}$$

حيث تقترح النسبة $K_1 = \frac{r_o}{r_i}$ (حيث يمثل r_o وr_i نصفي القطر الوسطي والداخلي على الترتيب) من قبل الهيئة ASM لإجراء حسابات الإجهاد الناتج عن الانحناء.



الشكل 5.3 : نابض شد مع نصف حلقة معدّلة لتشكل نهاية الوشيعة

وسيعطى الإجهاد الأعظمي τ_1 الناتج عن عزم الفتل P.r بشكل تقريبي بالعلاقة:

$$\tau_1 = \frac{8PD}{\pi d^3}\frac{4c_1 - 1}{4c_1 - 4}$$

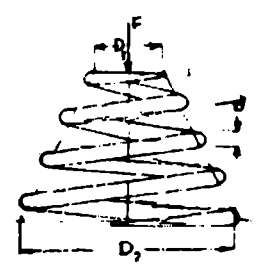
تعتمد قيمة الشد الابتدائي التي يمكن وضعها ضمن نابض شد بشكل رئيسي على دليل النابض $\frac{D}{d}$ ، وبشكل عام كلما كبر دليل النابض كلما صغرت حمولات الشد الابتدائية. وتعطى قيم حمولة الشد الابتدائية P_1 والتي يمكن الحصول عليها عملياً بالعلاقة:

$$P_1 = \frac{\pi \tau d^3}{8D}$$

حيث

τ = إجهاد الفتل غير المصحح الناتج عن الشد الابتدائي. وتؤخذ هذه الإجهادات τ والتي تحدد عملياً من المراجع الهندسية.

النوابض المخروطية



الشكل 5.4 : نابض مخروطي

يعطى الانحراف المحوري للنابض المخروطي المصنوع من سلك دائري المقطع بالعلاقة:

$$Y = \frac{2iF(D_2^3 + D_2^2 D_1 + D_2 D_1^2 + D_1^3)}{d^4 G}$$

حيث

Y = الانحراف أو مقدار الانضغاط، (mm).

i = عدد اللفات الفعّالة للنابض.

F = الحمل المحوري، N.

D_2 = قطر النابض عند قاعدته، mm.

D_1 = قطر النابض عند قمته، mm.

d = قطر سلك النابض، mm.

G = عامل الجساءة.

كما يعطى الانحراف المحوري للنابض المخروطي المصنوع من سلك مستطيل المقطع بالعلاقة:

$$y = \frac{0.71iF(b^2 + h^2)(D_2^3 + D_2^2 D_1 + D_2 D_1^2 + D_1^3)}{b^3 h^3 G}$$

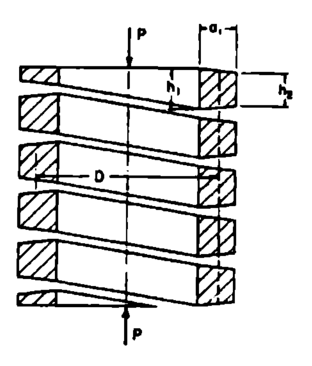
حيث:

b – السماكة وفق الاتجاه القطري، mm. تُعرّف

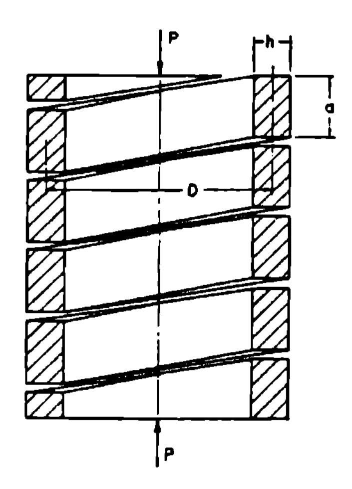
h – السماكة وفق الاتجاه المحوري، mm، وباقي المتحولات كما في العلاقة السابقة.

النوابض الحلزونية ذات الأسلاك المربعة والمستطيلة

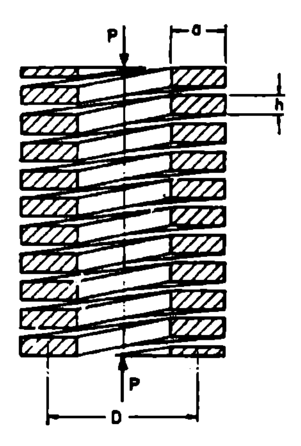
يظهر الشكلان 5.5 و5.6 النوابض ذات الأسلاك مربعة ومستطيلة المقطع. ويمكن تقدير مقدار الفلطحة الناتجة عن لف الأسلاك مربعة أو مستطيلة المقطع بالطرق على الساخن بالعلاقة:



الشكل 5.5 : نابض حلزوني ذو سلك مربع المقطع بتحميل محوري. (لاحظ بأن المقطع أصبح شبه منحرف خلال عملية اللف).



الشكل 5.6 : نابض حلزوني ذو سلك مستطيل المقطع والضلع الكبير مواز لمحور النابض



الشكل 5.7 : نابض حلزوني ذو سلك مستطيل المقطع ملفوف وفق الضلع الأكبر للمستطيل

$$h_1 = h\left[1 + \frac{k(D_o - D_i)}{D_o + D_i}\right]$$

حيث

D_o، D_i = قطري النابض الخارجي والداخلي على الترتيب.

h = السماكة الأصلية.

h_1 = السماكة بعد الفلطحة (الشكل 5.5).

$K = 0.3$ للنوابض الملفوفة على البارد.

$K = 0.4$ للنوابض الملفوفة على الساخن والمواد الملدنة.

الإجهـــاد غير المصحح: نستطيع الحصول على الإجهاد غير المصحح τ في النوابض ذات الأسلاك مربعة المقطع عبر افتراض أن السلك يتصرف كقضيب مستقيم تحت عزم الفتل. وبالتالي نحصل على:

$$\tau = \frac{2.4PD}{a^3}$$

حيث:

P = الحمل.

D = قطر اللف الوسطي.

a = طول ضلع مقطع السلك المربع.

حيث سيصبح المقطع على شكل شبه منحرف (الشكل 5.5)، وبالتالي ستؤخذ قيمة a كقيمة وسطية كما يلي: $(2a_1 + h_1 + h_2)/4$

الإجهاد المصحح: يعطى الإجهاد المصحح (والذي يتضمن تأثيرات اللف واتجاه القص وتلك المستخدمة لحساب مجال حمولات التعب) بالمعادلة التالية:

$$\tau' = K' \tau$$

$$K' = 1 + \frac{1.2}{c} + \frac{0.56}{c^2} + \frac{0.5}{c^3}$$

ويمثل c دليل النابض $\frac{D}{a_1}$ أو $c = \frac{D}{a}$. ويعطى عامل تصحيح الانحناء 'K في المراجع الهندسية.

وهـــذا العامل أخفض بقليل من العامل K الخاص بالأسلاك دائرية المقطع ويطبق عندما يكون العامل $c = \frac{D}{a}$ أكبر من 3.

الانحـــراف (التشوه): يعطى الانحراف δ في النابض الحلزوني ذو السلك مربع المقطع بالعلاقة:

$$\delta = \frac{5.59 P D^3 n}{G a^4}$$

حيث

n – عدد اللفات الفعالة.

G – عامـــل الجساءة. وتعطي هذه المعادلة خطأً نظرياً حوالي (2 - 4) % للنوابض التي يقع دليلها بين 3 و4، ولكنها دقيقة لمعظم الحالات العملية.

ونستطيع الحصول على نتائج أدق عبر استخدام العلاقة:

$$\text{نسبة النابض} = \frac{P}{\delta} = \frac{G a^4}{5.59 D^3 n}$$

الإجهاد غير المصحح: يعطى الإجهاد غير المصحح للنوابض ذات الأسلاك مستطيلة المقطع (الشكل 5.5 و5.6) بالعلاقة التالية:

$$\tau = \frac{PD}{k_1 a h^2}$$

حيث

a = الضلع الأطول من مقطع السلك.

h = الضلع الأقصر من مقطع السلك.

k_1 = عامل يعتمد على النسبة $\frac{a}{h}$ وهو معطى في المراجع الهندسية.

ويعطى الإجهاد المصحح 'τ بالعلاقة:

$$\tau' = \beta \frac{PD}{ab\sqrt{ab}}$$

حيث يؤخذ العامل β من المراجع الهندسية.

الانحراف (للنوابض ذات الدليل الكبير): من أجل النوابض ذات الأدلة الكبيرة $\frac{D}{a}$ أو $\frac{D}{h}$، يحسب الانحراف δ عبر الافتراض بأن النابض يتصرف مثل قضيب مستقيم، ببعدين a و h متعرض لعزم فتل $\frac{PD}{2}$، وبالتالي نحصل على العلاقة:

$$\delta = \frac{PD^3 n}{k_2 a h^3 G}$$

حيث

n = عدد اللفات الفعالة.

G = عامل الجساءة.

k_2 = عامل يتعلق بالنسبة $\frac{a}{h}$ يؤخذ من المراجع الهندسية.

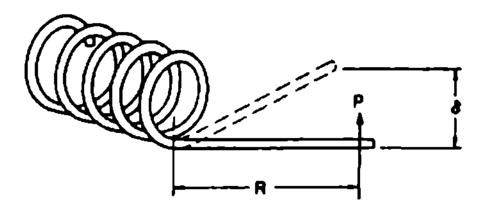
لاحظ بأن $h < a$.

يعطى ثابت صلابة النابض أو النسبة k بواحدات lb/in (Kg/cm) بالعلاقة:

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{a^2 b^2 G}{D^3 \pi \gamma}$$

نوابض الفتل الحلزونية

النوابض ذات الأسلاك دائرية المقطع. تصمم هذه النوابض عملياً عبر الافتراض بأن النابض سيضغط عبر العزم M المتوضع وفق محور الحلزون. وتطبق العلاقات التالية على النوابض ذات الأسلاك دائرية المقطع (الشكل 5.8):



الشكل 5.8 : الطريقة النموذجية لتحميل نابض الفتل

$$\sigma = \frac{10.2M}{d^3}$$

$$\sigma' = K_1 \sigma = K_1 \frac{10.2M}{d^3}$$

يـؤخذ العامـل K_1 هنا كتابع للنسبة $\frac{D}{d}$، ويعطى الانحراف الزاوي φ بالدورات والناتج عن العزم M بالعلاقة:

$$\varphi = \frac{10.2MnD}{Ed^4} \quad \text{دورة}$$

ويعطى الانحراف الزاوي φ_1 بالدرجات والناتج عن العزم M بالعلاقة:

$$\varphi_1 = \frac{3670MnD}{Ed^4} \quad \text{درجة}$$

ويُعطى ثابت صلابة النابض k بواحدة $\frac{in.lb}{\deg}\left(\frac{Cm.N}{\deg}\right)$ بالعلاقة:

$$k = \frac{M}{\phi_1} = \frac{Ed^4}{3670nD}$$

ويعطى الطول الفعلي للسلك المطلوب l بالعلاقة:

$$l = \frac{Ed^4}{1170k}$$

حيث

σ و'σ = الإجهاد غير المصحح والمصحح على التوالي.

D و d = قطر اللف الوسطي وقطر السلك على التوالي.

E = معامل المرونة.

n = عدد اللفات الفعالة.

النوابض ذات الأسلاك مربعة المقطع

$$\sigma = \frac{6M}{h^3}$$

$$\sigma' = K_2\sigma = K_2 \frac{6M}{h^3}$$

$$\varphi = \frac{6MnD}{Eh^4} \quad \text{دورة}$$

$$\varphi_1 = \frac{2160MnD}{Eh^4} \quad \text{درجة}$$

حيث

h = طول ضلع المقطع.

D = قطر اللف الوسطي.

K_2 = تابع النسبة $\frac{D}{h}$ ويؤخذ من المراجع الهندسية.

النوابض ذات الأسلاك مستطيلة المقطع

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2}$$

$$\sigma' = K_2\sigma = K_2\frac{6M}{bh^2}$$

$$\varphi = \frac{6MnD}{Ebh^3} \quad \text{دورة}$$

$$\varphi_1 = \frac{2160MnD}{Ebh^3} \quad \text{درجة}$$

حيث

h = العمق القطري للمقطع المستطيل.

D = قطر اللف الوسطي.

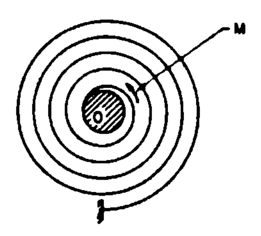
b = عرض المقطع المستطيل (بالاتجاه المحوري).

K_2 = تابع للنسبة $\frac{D}{h}$ ويؤخذ من المراجع الهندسية.

إذا تمّ تطبيق الحمل P على ذراع يبعد بمسافة R عن المحور، فإنه يمكن أخذ العزم M في المعادلـــة السابقة مساوياً للمقدار PR. ويعطى الانحراف في هذه الحالة بالاتجاه المحيطي عند نصف القطر R كما يلي ϕ_1.R/57.3.

نوابض الاستطاعة اللولبية والنوابض ثابتة القوة (NEG'ATOR)

تملـــك النوابض الشعرية عادةً عدداً كبيراً من اللفات غير المتماسة، وتكون إحدى نهايتيه موثوقة. ويَنتج عدد اللفات n عن العزم المطبق M (الشكل 5.9).



الشكل 5.9 : نابض لولبي بعدد لفات كبير (موثوق النهاية الخارجية)

$$n = \frac{6Ml}{\pi Ebh^3}$$

حيث

h − سماكة الشريط.

b − العرض.

l − طول الشريط الفعّال.

E − عامل المرونة.

يعطى الانحراف الزاوي بالدرجات لكل 360n.

كما ويعطى الإجهاد الناتج عن عزم الانحناء σ بالعلاقة:

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2}$$

أو

$$\sigma = \frac{\pi nhE}{l}$$

قد توضع نوابض المحرك أو القدرة (الشكل 5.10) - مثل تلك المستخدمة في الساعات - ضمن حاوية مفرّغة.

إذا كان l يمثل الطول الفعال للشريط وh هو سماكته، عندها تكون مساحة المقطع الكلية لنابض اللفائف مساوية للمقدار lh. وبالتالي:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi}lh + d_1^2}$$

حيث

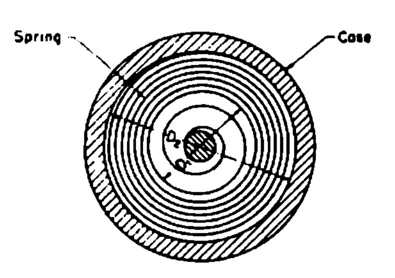
d_2 = القطر الخارجي للنابض ذو اللفائف.

d_1 = قطر المحور.

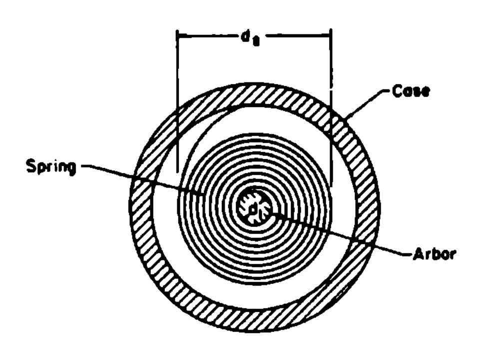
وبافتراض أن اللفائف قريبة من بعضها، فيمكن عندها حساب عدد اللفات للنابض ذو اللفائف بالعلاقة:

$$n = \frac{d_2 - d_1}{2h}$$

ويكون عدد اللفات الكلي ΔN المحررة من النابض في حالة عدم اللف (كما في الشكل 5.10) من النابض الملفوف (كما في الشكل 5.11) مساوياً للفرق بين n وn'، وبالتالي:



الشكل 5.10 : نابض قدرة غير ملفوف موضوع ضمن حاوية



الشكل 5.11 : نابض قدرة ملفوف حول محور

$$\Delta N = n - n'$$

$$= \frac{\sqrt{(4/\pi)lh + d_1^2} + \sqrt{D_2^2 - (4/\pi)lh} - (D_2 + d_1)}{2h}$$

$$l = \frac{D_2^2 - d_1^2}{2.55h}$$

و

$$\Delta N = \frac{D_2^2 - d_1^2}{2hU} = \frac{4l}{\pi U}$$

حيث

$$U = \frac{D_2^2 - d_1^2}{\sqrt{2(D_2^2 + d_1^2) - (D_2 + d_1)}}$$

يـتم الحصول على معادلات الإجهاد σ والعزم M وعدد اللفات الكلي ΔN عبر الافتراض بأن الشريط سيتعرض لعزم ثابت على كامل طوله:

$$M = \frac{\sigma b h^2}{6}$$

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2} = \frac{\pi E h \Delta N}{l}$$

$$\Delta N = \frac{6Ml}{\pi E b h^3} = \frac{\sigma l}{\pi E h}$$

أيضاً

$$h = \sqrt[3]{\frac{1.5MU}{Eb}}$$

حيث

b = عرض الشريط.

h = السماكة.

E = عامل المرونة

النوابض ثابتة القوة (Neg'ator)

يعطى الحمل P لمثل هذا النابض بالعلاقة:

$$P = \frac{Ebh^3}{26.4}\left[\frac{1}{R_n^2} - \left(\frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_1}\right)^2\right]$$

حيث:

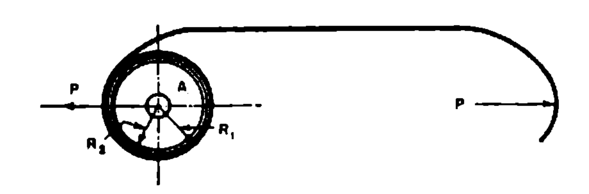
b و h = عرض وسماكة الشريط على التوالي.

E = عامل المرونة.

R_n = نصف قطر الانحناء الأصغري للفة.

R_1 = نصف قطر الوشيعة الخارجي.

معادلات التصميم للنوابض المبسوطة ثابتة القوة (Neg'ator Extension) : يمكن استخدام المعادلات التصميمية التالية المقدمة من Votta لمثل هذه الأنواع كما في الشكل 5.12.



الشكل 5.12 : نابض ثابت القوة (نابض مبسوط ثابت القوة)

للنوابض التي لها عشر لفات أو أقل:

$$h \geq \frac{26.4P}{EbS_f^2}$$

$$R_n = \sqrt{\frac{Ebh^3}{26.4P}}$$

$$b = \frac{26.4P}{EhS_f^2}$$

$$R_2 = 1.15R_n$$
$$L = \delta + 10R_2$$

حيث

P = الحمل.

R_n = نصف القطر الأصغري لانحناء اللفة.

L = الطول الكلي للنابض.

R_2 = نصف قطر الجلبة الملفوف عليها النابض.

δ = الانحراف المطلوب (أو الامتداد المطلوب).

S_f = عامل يعتمد على عدد مرات التشغيل.

للنوابض التي لها أكثر من عشر لفات:

$$h \geq \frac{26.4P}{EbS_f^2}$$

$$R_m = \sqrt{\frac{Ebh^3}{26.4P}}$$
$$R_n = \frac{R_m}{1.15}$$
$$R_2 = 1.15R_m$$
$$L = \delta + 10R_2$$

حيث

R_m = نصف القطر الأعظمي لانحناء اللفة.

نوابض الأقراص المخروطية او نوابض Belleville

يُفضل استخدام نوابض الأقراص المخروطية (والتي تعرف أيضاً بنوابض Belleville) في العديـــد من التصاميم لما لها من ميزات. هذه النوابض تتألف بشكل رئيسي من أقـــراص دائرية مقعرة بشكل مخروطي، كما هو واضح في المقطع المبين في الشكل 5.13.

عندما يتم تطبيق الحمولة على هذا النابض كما هو موضع فسيتسطح النابض نحو الخـــارج، ونتـــيجة لمرونته سيؤدي دور نابض. نفترض بأن الحمولة ستطبق على حوافه وتعطى كما يلي:

$$P = \frac{C_1 C E t^4}{R^2}$$

حيث

P = الحمل عند الانحراف δ عن الوضع غير المحمَّل.

C = عامل يعتمد على النسبة R/r.

R و r = نصفي القطر الخارجي والداخلي على الترتيب.

C_1 = عامل يعتمد على النسبتين δ/t و h/t يؤخذ من المراجع الهندسية.

h = ارتفاع المخروط الابتدائي المشكل للنابض.

t = السماكة.

ويعطى الإجهاد المرن عند الانحراف δ (إذا كان بإشارة سالبة فهذا يعني أنه إجهاد ضغط) كما يلي:

$$\sigma_c = -K_c \frac{Et^2}{R^2}$$

$$\sigma_{t1} = K_{t1} \frac{Et^2}{R^2}$$

$$\sigma_{t2} = K_{t2} \frac{Et^2}{R^2}$$

حيث

E = عامل المرونة.

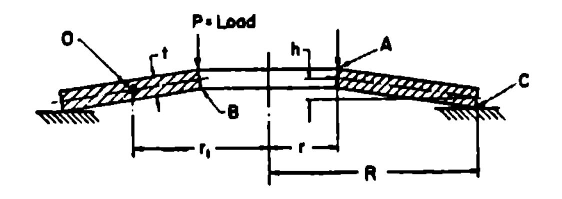
σ_c = الإجهاد عند الحافة الداخلية العلوية A.

σ_{t1} = الإجهاد عند الحافة الداخلية السفلى B.

σ_{t2} = الإجهاد عند الحافة الخارجية السفلى C.

تعتمد العوامل K_c وK_{t1} وK_{t2} على النسب $\frac{\delta}{t}$ و $\frac{h}{t}$ و $\frac{R}{r}$ على الترتيب.

ويمكن أن تؤخذ قيمة العامل K_c من أجل أي قيمة للنسبة $\frac{h}{t}$ و $\frac{\delta}{t}$ من مخططات موجودة في المراجع الهندسية.



الشكل 5.13 : نابض قرص مخروطي (نابض Belleville)

الإجهـــاد الاسمي σ_n: ويدعى هذا الإجهاد أيضاً بإجهاد الانحناء البسيط، ويستخدم من أجل الحمولات الستاتيكية.

$$\sigma_n = \frac{0.96P}{t^2}$$

المعادلات الخاصة بانحراف وارتفاع المخروط الصغيرين

تعـــتمد هذه المعادلات على نظرية الصفيحة المستوية المرنة (elastic flat-plate theory)، وتفترض بأن قيمة النسبتين δ/t وh/t هي أقل من 0.5، كما تفترض أيضاً بأن الحمل يؤثر عند الحواف:

$$P = K_1 \frac{\delta E t^3}{R^2}$$

$$P = \frac{\sigma t^2}{K_3}$$

$$\sigma = K_2 \frac{\delta E t}{R^2}$$

$$\sigma = K_3 \frac{P}{t^2}$$

$$\delta = \frac{PR^2}{K_1 E t^3}$$

حيث

σ = الإجهاد عند الحافة الداخلية، وفي هذه الحالة تعتمد العوامل K_1 وK_2 وK_3 على النسبة R/r.

الحمل 'P المطبق داخل الحواف

$$P' = P\frac{R-r}{a}$$

$$\delta' = \delta\frac{a}{R-r}$$

حيث

a = المسافة القطرية بين الحافتين.

'P = الحمل على الحافتين.

'δ = الانحراف بين الحافتين.

يحسب الحمل P من أجل انحراف δ معطى بين الحافتين الداخلية والخارجية. وتحسب الإجهادات σ_c و σ_{t1} و σ_{t2} من النسبتين δ/h و h/t.

ويعطى الإجهاد الاسمي σ_n بالعلاقة:

$$\sigma_n = 0.96\frac{P'}{t^2}\frac{a}{R-r}$$

النوابض المستوية والورقية

نابض الدعامة البارزة البسيط ـ عرض ثابت

الانحرافات الصغيرة: إن أبسط نوع من أنواع النوابض المستوية هو نابض الدعامة البارزة البسيط، والمحمل بحمل عند طرفه الحر (كما في الشكل 5.14). وتعطى قيمة الانحراف في هذه الحالة بالمعادلة المعروفة التالية:

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI}$$

حيث

l - طول النابض.

E - عامل المرونة.

I - عـــزم عطالـــة مقطـــع النابض العرضي ($I = \frac{b_o h^3}{12}$ ، حيث b_o العرض و h السماكة).

وإذا أردنـــا نتـــيجة أدق في الحـــالات التي يكون فيها عرض الشريط أكبر بكثير بالمقارنة مع السماكة، أي b_o/h كبيرة حيث أن b_o مقاربة للطول l، يجب أن نأخذ عزم العطالة كما في المعادلة

$$\frac{b_o h^3}{12}(1 - \nu^2)$$

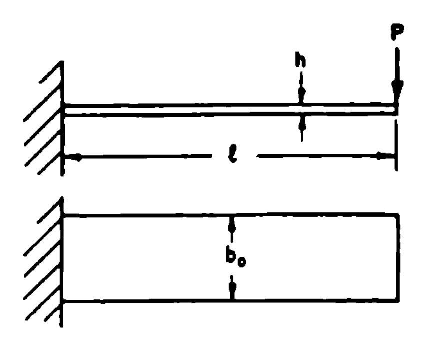
حيث : ν نسبة بواسون.

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI}(1 - \nu^2)$$

وتكـــون قيمة ν من أجل معظم المعادن مساوية 0.3، مما يعني بأن النابض في مثل هذه الحالات سيكون أصلب بمقدار 10 % من القيمة المحسوبة، ومع ذلك تقع قيمة الانحراف في معظم الحالات العملية ضمن النتائج المحسوبة.

يعطى إجهاد الانحناء الاسمي σ عند حافة النابض المبين في الشكل 5.14 بالعلاقة:

$$\sigma = \frac{6Pl}{b_o h^2}$$



الشكل 5.14 : نابض الدعامة البارزة البسيط

نابض الدعامة البارزة البسيط ذو شكل شبه المنحرف

القوليات (الانحرافات) الصغيرة: تستخدم في حالات عديدة النوابض الورقية التي تأخذ صفائحها أشكال أشباه منحرفة (الشكل 5.15). يعطى التدلي وفق نظرية الجوائز كما في العلاقة:

$$\delta = K_1 \frac{Pl^3}{3EI_o}$$

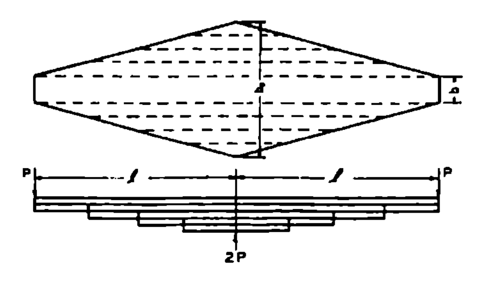
حيث

$$K_1 = \frac{3}{(1 - b/b_o)^3}\left[\frac{1}{2} - 2\frac{b}{b_o} + \left(\frac{b}{b_o}\right)^2\left(\frac{3}{2} - \ln\frac{b}{b_o}\right)\right]$$

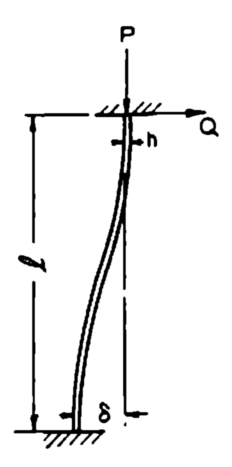
I_o = عزم العطالة عند النهاية الداخلية، بينما يعتمد العامل K_1 على النسبة $\frac{b}{b_o}$ ويمكن أخذه أيضاً من المراجع الهندسية.

النوابض المستوية المعرضة لحمولة مركبة محورية وجانبية

غالباً ما تحمّل النوابض المستوية في الحياة العملية كما في الشكل 5.16، حيث تعتبر إحدى النهايتين موثوقة، بينما يسمح للأخرى بالحركة وفق الاتجاه الجانبي ولكنها تُمـنَع من الدوران. إذا كان الحمل المحوري P صغيراً بالمقارنة مع قوة الربط فإن الإزاحة والإجهاد يعطيان كما يلي:



الشكل 5.15 : نابض ورقي مكافئ لنابض دعامة بارزة ذو شكل شبه منحرف



الشكل 5.16 : نابض مستوي خاضع لحمل مركب محوري وجانبي

$$\delta = \frac{Ql^3}{12EI}$$

$$\sigma = \frac{38Eh}{l^2}$$

حيث

l – طول الجائز.

Q – الحمل الجانبي.

$I = bh^3/12$ – عزم عطالة المقطع.

b – العرض.

h – السماكة.

δ – الانحراف الكلي.

σ – الإجهاد الاسمي عند النهاية الموثوقة (مع إهمال تأثير حالة تركيز الإجهاد).

إذا كان الحمل المحوري P (كما في الشكل 5.16) ليس صغيراً بالمقارنة مع حمولات الانحنـــاء فعندها لن تعطي المعادلتان السابقتان دقة مقبولة. وإن من الأدق في مثل هذه الحالات أن يضرب الإجهاد والانحراف المحسوبان بالعلاقتين السابقتين بعاملين C_1 وK_2، واللذين يعتمدان على النسبة $P/P_{cr} = Pl^2/EI\pi^2$ حيث يمثل P_{cr} حمل انحناء Euler للنهايات المتمفصلة، ويعطى هذان العاملان بالعلاقتين:

$$C_1 = \frac{1}{1 - P/P_{cr}}$$

$$K_2 = 1 - 0.178\frac{P}{P_{cr}}$$

ويصبح بالتالي الإجهاد والانحراف كما يلي:

$$\sigma = K_2 \frac{3\sigma E h}{l^2}$$

$$\delta = C_1 \frac{Q l^3}{12 E I}$$

يعبر الإجهاد σ عن المجال الناتج عن الانحراف الجانبي δ.

ويمكن إعطاء علاقة أكثر دقة للانحراف δ للنابض المبين في الشكل 5.16 كما يلي:

$$\delta = \frac{Ql}{P} \frac{(2 \tan kl)/2 - kl}{kl}$$

حيث :

$$k = \sqrt{\frac{P}{EI}}$$

النوابض الورقية

تستخدم النوابض الورقية - والتي تكون أقل فاعلية من النوابض الحلزونية من حيث الطاقــة المخــزنة لكل باوند من المادة - بشكل واسع في مجال صناعة السيارات وذلك لأنها تلعب دوراً كعناصر إنشائية أيضاً.

يعتمد التصميم العملي للنوابض الورقية على افتراض أنها جوائز ذات متانة منتظمة، ويكافــئ هذا الفرض الفرض بأنها نوابض دعامة بارزة ذات مقطع مثلثي. ويعطى الإجهــاد الأعظمي σ والنسبة R تحت هذا الفرض للنابض الورقي شبه الاهليلجي المتناظر كما يلي:

$$R = \frac{P}{\delta} = \frac{8Enbh^2}{3l^3}$$

$$\sigma = \frac{3Pl}{2nbh^2}$$

حيث

n = عدد الورقات.

b = العرض.

h = سماكة الورقة.

l = الطول.

P = الحمل.

وتصبح بالنسبة للنوابض الورقية شبه الاهليلجية غير المتناظرة (الشكل 5.17b Fig) كما يلي:

$$\text{النسبة} \quad R = \frac{P}{\delta} = \frac{Ebnh^3 l}{6 l_1^2 l_2^2}$$

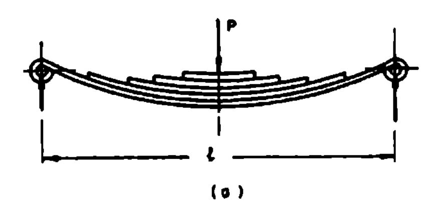
$$\text{الاجهاد} \quad \sigma = \frac{6 P l_1 l_2}{nbh^2 l}$$

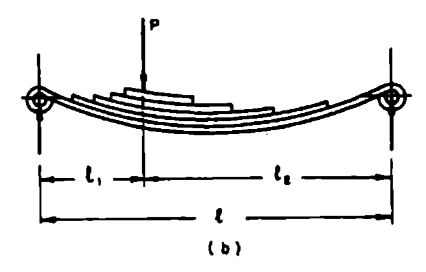
أمـــا إذا كان النابض الورقي على شكل دعامات بارزة (الشكل 5.17c) يحوي n ورقة، و l يمثل طول أطول ورقة عندها تصبح المعادلتان كما يلي:

$$\text{النسبة} \quad R = \frac{P}{\delta} = \frac{Ebnh^3}{6 l^3}$$

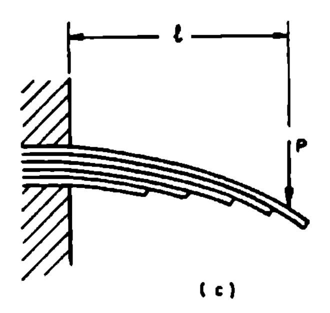
$$\text{الاجهاد} \quad \sigma = \frac{6 P l}{nbh^2}$$

SECTION FIVE





الشكل **5.17** : نوابض ورقية : a) على شكل شبه اهليلجي متناظر
b) على شكل شبه اهليلجي غير متناظر



الشكل **5.17** : نوابض ورقية   c) على شكل دعامة بارزة   /تابع/

الجدول 5.1

الحجوم القياسية للنوابض المستوية (النوابض الصفائحية المستخدمة في صناعة السيارات)

العرض	(mm)	40,	45,	50,	55,	60,	65,	70,	75,	90,	100,	120 and 150.
السماكة	(mm)	4,	5,	6,	7,	8,	10,	12,	14 and 16.			

نوابض قضبان الفتل

عموميات

تتألف نوابض قضبان الفتل بشكل رئيسي من قضبان مستقيمة من معدن نابضي (الشكل 5.18) تتعرض بشكل رئيسي لعزم فتل. فتتخزن عندها فيه الطاقة بسبب فتل القضيب؛ كما في النوابض المستخدمة في تعليق المركبات السيارة وفي تطبيقات أخرى.

سنورد فيما يلي المعادلات التصميمية لنوابض قضبان الفتل متغيرة المقطع والمعرَّضة لعزوم فتل صرفة. (وإذا تعرضت هذه النوابض لعزوم انحناء فعلينا أخذ الإجهادات الناتجة عن هذه العزوم بعين الاعتبار).

قضيب مصمت دائري المقطع

$$\phi = \frac{584 M_t l}{d^4 G}$$

$$\tau = \frac{16 M_t}{\pi d^3}$$

حيث

ϕ – الزاوية النهائية، deg.

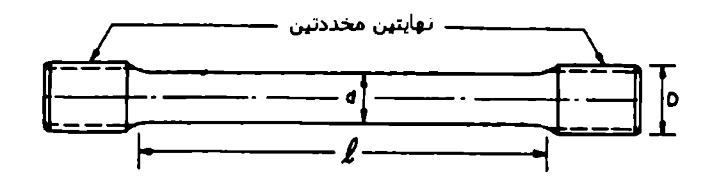
τ – إجهاد القص.

M_t – عزم الفتل المطبّق.

d – قطر القضيب.

l – الطول الفعّال للنابض.

G – عامل الجساءة.



الشكل 5.18 : نابض قضيب فتل بنهايتين مخددتين

قضيب مفرّغ دائري المقطع

إذا كـــان القضـــيب مفـــرغاً ذا قطر خارجي d وقطر داخلي d_1 فتصبح عندها المعادلتان:

$$\phi = \frac{584 M_t l}{G(d^4 - d_1^4)}$$

$$\tau = \frac{16 M_t d}{G(d^4 - d_1^4)}$$

قضيب مربع المقطع

$$\phi = \frac{407 M_t l}{a^4 G}$$

$$\tau = \frac{4.81 M_t}{a^3}$$

حيث

a = طول ضلع المقطع المربع.

قضيب مستطيل المقطع

$$\phi = \frac{57.3 M_t l}{K'_1 a h^3 G}$$

$$\tau = \frac{M_t}{K'_2 a h^2}$$

حيث

a = الطول.

h = سماكة المقطع المستطيل الشكل، ويعتمد العاملان K'_1 وK'_2 على النسبة a/h.

نوابض الفتل المحملة بواسطة ذراع

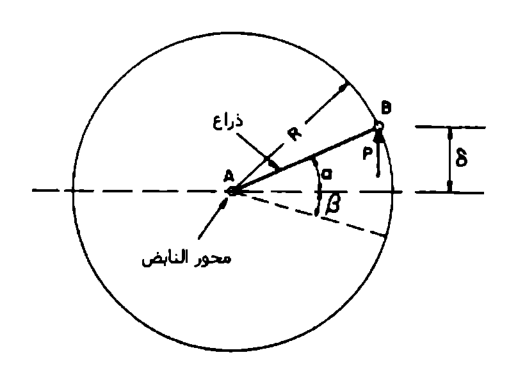
غالباً ما تحمّل نوابض الفتل عبر ذراع AB (الشكل 5.19) موصول إلى إحدى نهايتيه، والتي تستند إلى مدحرج بينما تكون النهاية الأخرى موثوقة أو مثبتة. إذا ما تم قياس الانحراف δ بالنسبة للخط الأفقي بينما كانت الحمولة P شاقولية وكان القضيب دائري المقطع فيكون لدينا:

$$P = \frac{\pi d^4 G(\alpha + \beta)}{32 l R \cos\alpha}$$

تقاس α وβ هنا بالراديان، حيث تمثل:

α الزاوية بين الذراع AB والخط الأفقي المرجعي.

β الزاوية بين الذراع والخط الأفقي المرجعي عندما تكون الحمولة معدومة.



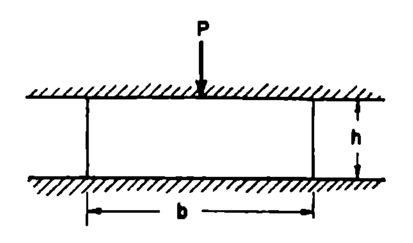
الشكل 5.19 : نابض قضيب فتل محمّل بواسطة ذراع

تُعرَّف النسبة الشاقولية عند النهاية B للذراع (الشكل 5.19) بالعلاقة $k = dP/d\delta$

$$k = \frac{\pi d^4 G}{32 l R^2} \frac{1 + (\alpha + \beta)\tan\alpha}{\cos^2\alpha}$$

النوابض المطاطية ونوابض التثبيت

يمكن تقدير الانحراف δ لكتلة مضغوطة غير مسندة (الشكل 5.20) بشكل تقريبي من المعادلة التالية، مع الافتراض بأن السطح المضغوط مزيّت جيداً وبالتالي سنسمح له بالتمدد الجانبي بحرية مع افتراض وجود انفعالات صغيرة.



الشكل 5.20 : كتلة مطاطية محملة بحمولة ضغط

$$\delta = \frac{Ph/AE}{1 + P/AE}$$

حيث

P = الحمل.

A = مساحة مقطع الشطيرة الأصلي.

h = السماكة الأصلية.

تعتمد هذه المعادلة على مبدأ ثبات حجم الكتلة المطاطية المضغوطة.

نوابض القص أو التي على شكل شطائر

تستخدم نوابض القص أو التي على شكل شطائر والمؤلفة من وسادتين مطاطيتين مثبتتين على صفيحتين فولاذيتين بشكل واسع في مجال عزل الاهتزازات أو تثبيت الآلات.

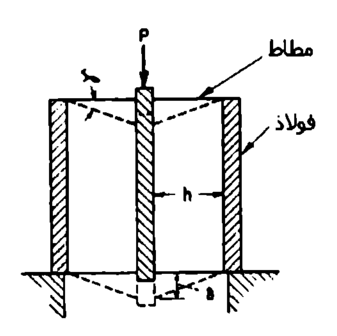
يُعطى إجهاد القص $\tau = \frac{P}{2A}$ حيث A = مساحة مقطع كل وسادة، كما وتساوي زاوية القص γ إلى τ/G حيث G معامل الجساءة.

ومن أجل الانحرافات الصغيرة $\gamma = \delta/h$ [rad]، حيث δ = الانحراف، h = سماكة الوسادة.

وبالتالي لدينا:

$$\delta = \frac{Ph}{2AG}$$

تعطى قيم المعامل G ومن أجل الانحرافات الصغيرة كتابع لقساوة مقياس التحمل في المراجع الهندسية.



الشكل 5.21 : نابض قص بسيط أو على شكل شطيرة

نوابض القص الاسطوانية

ارتفاع محوري ثابت

يتألف هذا النوع من نوابض القص بشكل رئيسي من وسادة اسطوانية مثبتة إلى حلقة فولاذية من الخارج وإلى محور أو حلقة من الداخل (الشكل 5.22). ويتم تطبيق حمولة P على طول المحور.

ويُعطى إجهاد القص τ عند أي نصف قطر r كما يلي:

$$\tau = \frac{P}{2\pi rh}$$

إذا كانت y تعبّر عن الانحراف عند نصف القطر r، فبشكل تقريبي يمكن أن نكتب:

$$dy/dr = -\tau/G$$

وباستخدام الانحراف الكلي δ تصبح قيمة δ بشكل تقريبي مساوية إلى:

$$\delta \approx \frac{P}{2\pi hG} \ln \frac{r_o}{r_i}$$

إجهاد ثابت

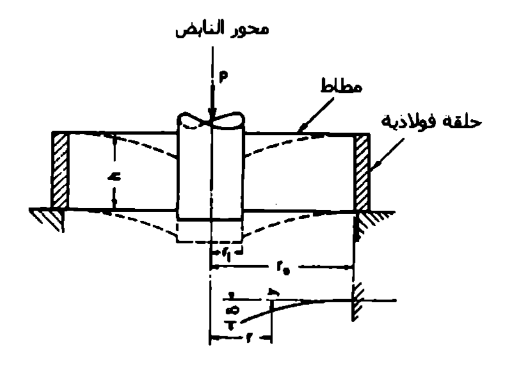
إذا كانت سماكة النابض المطاطي الاسطواني h متناسبة عكساً مع نصف القطر r، عندها سيكون إجهاد القص ثابتاً وسنحصل على استثمار أفضل للمادة.

وبأخذ $r = \frac{r_o h_o}{h}$

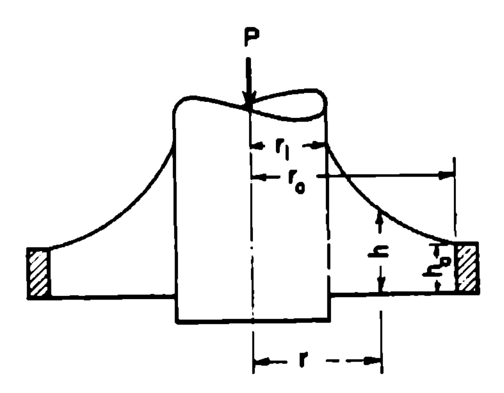
حيث

h_o = السماكة عند نصف القطر الخارجي r_o.

فإننا نحصل على المعادلة التالية:



الشكل 5.22: نابض قص اسطواني بارتفاع محوري ثابت وبحمولة محورية



الشكل 5.23: نابض قص اسطواني بسماكة متغيرة واجهاد قص ثابت

$$\tau = \frac{P}{2\pi r_o h_o} = const$$

وسيكون الانحراف δ تقريباً مساوياً إلى $\frac{\tau}{G}$ مضروباً بالحد $(r_o - r_i)$ أي:

$$\delta \approx \frac{P(r_o - r_i)}{2\pi r_o h_o G}$$

نوابض الفتل الاسطوانية

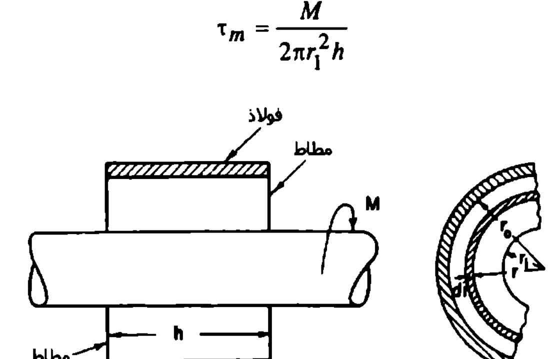
ثابتة السماكة

تؤخذ سماكة النابض h في هذه الحالة كقيمة ثابتة (الشكل 5.24)، بينما يؤثر عزم الفتل M على محور النابض. يعطى إجهاد القص τ عند نصف القطر r والناتج عن العزم M كما يلي:

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 h}$$

نحصـــل على إجهاد القص الأعظمي τ_m في هذه الحالة عندما $r = r_i$ والذي يساوي إلى:

$$\tau_m = \frac{M}{2\pi r_1^2 h}$$



الشكل 5.24 : نابض فتل اسطواني مطاطي ثابت السماكة

ويُعطى الانحراف الزاوي بالعلاقة:

$$\theta = \frac{M}{4\pi hG}\left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2}\right)$$

حيث تعطى الزاوية θ بالراديان.

وســـنورد فـــيما يلـــي جدولاً بأصناف وقياسات الأسلاك المستخدمة في صناعة النوابض اللولبية:

الجدول 5.2 أصناف وحجوم الأسلاك

الصنف	وصف السلك	قطر السلك (mm)	مجال الاستخدام
1	سلك مسحوب قاسي (بدون تلدين)	2.8 وما فوق	يستخدم للنوابض المعرضة لأحمال ستاتيكية أو بطيئة التغيير، ويستخدم للإجهادات المنخفضة.
2	سلك مسحوب قاسي (مع تلدين)	0.25 حتى 10.0	يستخدم للنوابض المعرضة لأحمال دورية متوسطة، ولإجهادات متوسطة.
3	سلك عالي التشغيل (غير مجلّخ)	0.25 حتى 10.0	يستخدم للنوابض المعرضة لحمولات ستاتيكية عالية تحت الإجهادات الديناميكية المتوسطة حتى العالية، ويستخدم للأقطار الأصغر حتى لو تعرض النابض لحمولات صدم.
4	سلك عالي التشغيل (مجلّخ)	0.25 حتى 10.0	مناسب للنوابض المعرضة لإجهادات ستاتيكية عالية جداً، والنوابض المعرضة لإجهادات ديناميكية متوسطة.

وسنورد الآن جدولاً يحوي الأقطار القياسية للأسلاك.

الجدول 5.3 الأقطار القياسية للأسلاك (mm)

سلك فولاذي غير قابل للصدأ يستخدم لمقاومة التآكل العادية	أسلاك فولاذية لنوابض مقسّاة ومراجعة وأسلاك نوابض الصمامات	أسلاك فولاذية مسحوبة على البارد غير خلائطية
0.10, 0.11, 0.125	1.00 to 1.10 - 0.05	0.07 to 0.12 - 0.01
0.14 to 0.22 - 0.02	1.2, 1.25	0.14 to 0.22 - 0.02
0.25	1.30 to 2.10 - 0.10	0.25
0.28 to 0.40 - 0.02	2.25	0.28 to 0.40 - 0.02
0.43, 0.45, 0.48, 0.50	2.40 to 2.60 - 0.10	0.43, 0.45, 0.48
0.53, 0.56, 0.60, 0.63	2.80 to 4.00 - 0.20	0.50, 0.53, 0.56
0.65 to 1.30 - 0.05	4.25 to 5.00 - 0.25	0.60, 0.63
1.40 to 2.10 - 0.10	5.30, 5.60, 6.00, 6.30	0.65 to 1.30 - 0.05
2.25; 2.40, 2.50, 2.60	6.50 to 11.00 - 0.50	1.40 to 2.10 - 0.10
2.80, 3.00, 3.15	12.0, 12.5, 13.0,	2.25, 2.40, 2.50
3.20 to 4.00 - 0.20	14.0	2.60, 2.80, 3.00
4.25 to 5.00 - 0.25		3.20 to 4.00 - 0.20
5.30, 5.60, 6.00, 6.30		4.25 to 5.00 - 0.25
6.50 to 10.00 - 0.50		5.30, 5.60, 6.00, 6.30
		6.50 to 11.0 - 0.50
		12.0, 12.50
		13.00 to 17.00 - 1.00

ويـبين الجدول التالي المقاطع القياسية للنوابض المستوية (النوابض الصفائحية ذات الصفائح المدرفلة)

الجدول 5.4 كل الأقطار معطاة بالمليمتر

السماكة	العرض	السماكة	العرض	السماكة	العرض
10	115	6	90	10	50
11	115	8	90	13	50
13	115	10	90	6	63
16	115	11	90	8	63
19	115	13	90	10	63
16	120	16	90	11	63
19	120	19	90	13	63
10	125	8	100	6	75
13	125	10	100	8	75
16	125	11	100	10	75
11	140	13	100	11	75
13	140	16	100	13	75
11	150	19	100	16	75
13	150				
16	150				

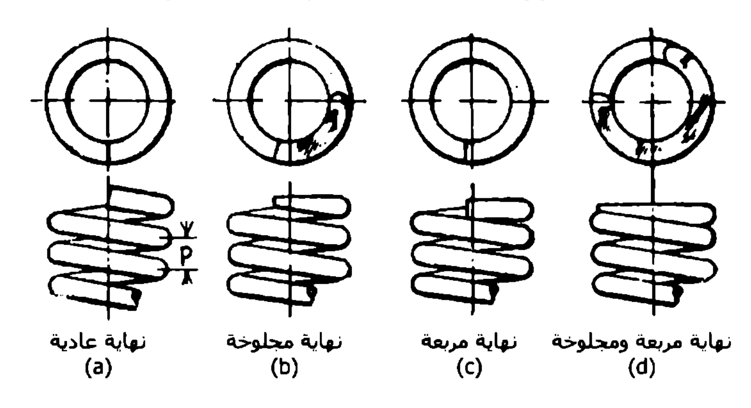
أما الجدول التالي فيعطي إجهادات تصميم النوابض.

الجدول 5.5 MN/m^2 (kgf/mm^2) إجهادات التصميم للنوابض

حمولات تشغيل عالية	حمولات تشغيل متوسطة	حمولات تشغيل قليلة	قطر السلك (mm)
640 (65.4)	517 (52.7)	414 (42.2)	Upto 2.10
586 (59.8)	476 (48.5)	380 (38.7)	2.10 - 4.50
510 (52.0)	414 (42.2)	330 (33.8)	4.50 - 8.00
448 (45.7)	360 (36.6)	290 (29.5)	8.00 - 13.00
386 (39.4)	310 (31.6)	248 (25.3)	13.00 - 25.00
345 (35.2)	276 (28.1)	220 (22.5)	25.00 - 38.00

وسنورد الآن كيفية حساب عدد اللفات الفعالة كتابعة لنوع نهاية النابض.

الأنواع المختلفة لنهايات وشيعة النابض



الشكل	العدد الحقيقي للفات	الطول المفرود	الطول الحر
(a)	i	(i + 1)d	ip + d
(b)	i	(id)	ip
(c)	i + 2	(i + 3)d	ip + 3d
(d)	i + 2	(i + 2)d	ip + 2d

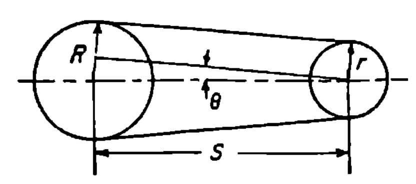
حيث i تمثل العدد الفعال للفات.

السيور المسطحة (الأقشطة)

طول السير

يعطى الطول الكلي للسير (الشكل 5.25) بالعلاقة:

$$L = 2S \cos\theta + \pi [R + r + (R - r)\theta/90] \quad \text{in}$$



الشكل 5.25 : شكل نموذجي للقيادة عبر السير

حيث

S = المسافة بين مركزي البكرتين.

R = نصف قطر البكرة الكبيرة (السيور المسطحة) أو القطر الخطوي للبكرة الكبيرة (السيور على شكل V).

r = نصف قطر البكرة الصغيرة (السيور المسطحة) أو القطر الخطوي للبكرة الصغيرة (السيور على شكل V).

$\theta = \sin^{-1} [(R - r)/S]$, deg.

تعبر نسبة السرعة عن النسبة بين السرعة الزاوية للمحور القائد إلى السرعة الزاوية للمحور المقاد، وبالتالي:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1}$$

$$N_1 D_1 = N_2 D_2$$

حيث

N_1 = سرعة دوران المحور القائد، rmp.

N_2 = سرعة دوران المحور المقاد، rpm.

D_1 = قطر البكرة القائدة.

D_2 = قطر البكرة المقادة.

تهمـــل سماكة السير المسطح في حالة السيور المسطحة، كما ويعتبر القطر الخارجي للبكرة هو قطر البكرة.

عندما نستخدم القيادة عبر سلسلة علينا تطبيق العلاقة:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

حيث

n_1 = عدد أسنان الدولاب المسنن القائد.

n_2 = عدد أسنان الدولاب المسنن المقاد.

سرعة السير

يمكن إيجاد السرعة التي يتحرك بها السير عبر تطبيق العلاقة:

$$V = \frac{\pi DN}{12} = 0.262DN$$

حيث

V = السرعة، ft/min (m/min).

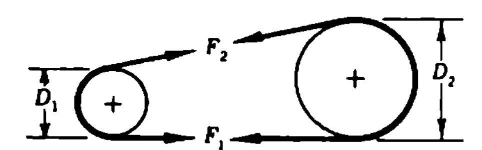
D = قطر البكرة، in (cm).

N = سرعة الدوران، rpm.

قوة الشد المؤثرة على السير

يمكـــن إيجاد العزم المؤثر على البكرة الصغرى اعتماداً على الشكل 5.26 - حيث تمـــثل F_1 قوة الشد على الجانب المشدود وF_2 قوة الشد على الجانب المرتخي (غير المشدود) من البكرة - بالعلاقة:

$$T_1 = (F_1 - F_2)\frac{D_1}{2}$$



الشكل 5.26 القوى المؤثرة على السير

كما ويعطى العزم عند البكرة الكبرى كما يلي:

$$T_2 = (F_1 - F_2)\frac{D_2}{2}$$

يعرف الحد $F_1 - F_2$ بالشد الصافي.

الاستطاعة المنقولة

تعطى معادلة الاستطاعة المنقولة بواسطة السير بالحصان وفق العلاقة التالية:

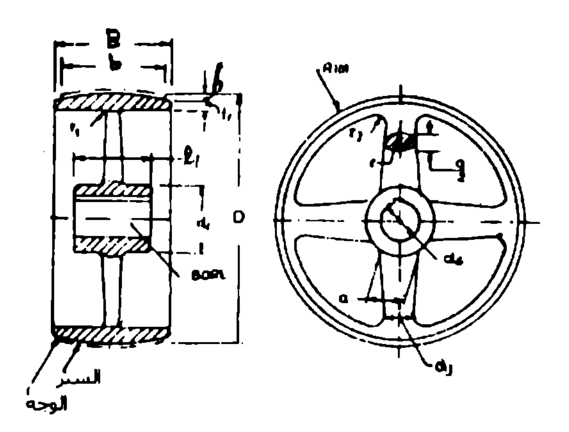
$$hp = F_e \frac{0.262DNW}{33,000} = \frac{F_e DNW}{126,000}$$

حيث

F_e = الشد الصافي على عرض السير، lb/in (Kg/cm).

W = عرض السير، in (cm).

تصميم البكرات المصنوعة من حديد الصب



الشكل 5.27 بكرة حديد صب

يحسب قطر البكرة الصغرى وفق علاقة Saverin التجريبية كما يلي:

$$d = D_{\min} = (525 - 630)\sqrt[3]{\frac{P(KW)}{2\pi n_{\max}}}$$

حيث

n_{max} = سرعة الدوران الأعظمية، rev/sec.

تعتـــبر هذه العلاقة صحيحة في حالة النقل مع تخفيض سرعة الدوران (أي البكرة القائـــدة هي الصغيرة). أما إذا كان النقل مع زيادة سرعة الدوران فيجب عندها معرفة سرعة السير V ومن ثم يتم تحديد القطر d.

ويعطى قطر البكرة المقادة بالعلاقة:

$$D = (1 - \epsilon)\, di$$

حيث

ϵ معامل الزحف وقيمته من 0.01 وحتى 0.03.

i نسبة السرع.

ويعطى عرض وجه البكرة (معادلة Barth) كما يلي:

$$B = 1\frac{3}{16}b + 10.0\,mm$$ (للسيور ذات زمن التشغيل العالي)

$$B = 1\frac{3}{32}b + 5.0\,mm$$ (للسيور التي تعمل لأوقات قصيرة)

b: عرض السير أو القشاط.

ويعطى عدد أذرع البكرة تبعاً لقطرها كما يلي:

- من أجل D < 200 mm نستخدم الأوتار
- من أجل D = 200 mm وحتى D = 450 mm نأخذ عدد الأذرع i = 4.
- D > 450 mm نأخذ عدد الأذرع i = 6.

وتكون مساحة مقطع الذراع الأهليلجي بالقرب من المحور:

$$a = 2.94\sqrt[3]{BD/4i}$$ لسير مفرد

$$a = 2.94\sqrt[3]{BD/2i}$$ لسير مضاعف

بيـــنما تكون مساحة مقطع الذراع بالقرب من الإطار (a1) متناقصة 4 mm لكل 100 mm.

ويكون نصف قطر التقوس بين الذراع والإطار بالقيمة:

$$r = \frac{3}{4}a$$

ويعطى تقريباً مقدار تقوس سطح البكرة بالعلاقة:

$$h = 0.003\ D$$

وتعطى العلاقة بين قطر المحور المدير للبكرة وبين قطر البطيخة (hub) كما يلي:

$$\frac{d_1 - d_s}{2} = 0.412\sqrt[3]{B.D} + 6\,mm \quad \text{للسير المفرد}$$

$$= 0.529\sqrt[3]{B.D} + 6\,mm \quad \text{للسير المضاعف}$$

حيث

B = عرض السير، mm.

D = قطر البكرة، mm.

d_1 = قطر البطيخة، mm.

d_s = قطر المحور، mm.

ويكون طول البطيخة

$$l_1 \geq \frac{2}{3}B$$

$$\leq B$$

$$\geq 1.5\,d_s$$

وتكون سماكة الإطار الخارجي للبكرة محددة بالعلاقة:

$$t_r = \frac{D}{200} + 3mm$$ للسير المفرد

$$t_r = \frac{D}{200} + 6mm$$ للسير المضاعف

وسنورد فيما يلي الأقطار النظامية للبكرات المصنوعة من الحديد الصب والبكرات المصنوعة من الفولاذ المتوسط الكربون معطاة بالميليميتر:

الجدول 5.6

40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 160, 180, 200, 224, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1600, 1800, 2000.

كما ويعطى عرض سطح البكرات النظامية المصنوعة من الحديد الصب والفولاذ المتوسط الكربون بالجدول التالي معطى بالميليمتر:

الجدول 5.7

20, 25, 32, 40, 50, 53, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 160, 180, 200, 224, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630,

السيور التي على شكل حرف V

تصنف هذه السيور وفق خمسة أصناف مبينة في الجدول التالي:

الجدول 5.8

رمز السير V	A	B	C	D	E
العرض الاسمي للوجه العلوي للسير (mm)	13	17	22	32	38
السماكة الاسمية (mm)	8	11	14	19	23
السرعة العظمى المفضلة (m/s)	25	25	25	30	30
المجال المفضل للاستطاعة المنقولة (KW)(Mhp)	0.4 - 4.0 (0.5 - 50)	1.5 - 15 (2 - 20)	10 - 70 (15 - 100)	35 - 150 (50 - 200)	70 - 260 (100 - 350)
عدد الأسلاك الأعظمي	6	9	12	14	20

وتعطى العلاقة بين قوى الشد المطبقة على السير V وعند سرعات عالية بالعلاقة:

$$\frac{T_1 - T_c}{T_2 - T_c} = e^{\mu_1 \theta}$$

حيث

T_1 – قوة الشد عند الجانب المشدود، N (Kgf).

T_2 – قوة الشد عند الجانب غير المشدود، N (Kgf).

T_c – القوة المركزية المؤثرة على السير.

θ – قوس التماس بين السير والبكرة، rad.

$\mu_1 = \mu/\sin(\alpha/2)$ معامل الاحتكاك الظاهري.

α – زاوية التجويف داخل البكرة الذي على شكل V.

μ – معامل الاحتكاك بين السير ومعدن البكرة ويعطى وفق معادلة Barth كما يلي:

$$\mu = 0.54 - \frac{0.712}{2.542 + v}$$

v: سرعة السير m/sec، هذا إذا كان السير جلدي والبكرة فولاذية أما إذا كان غير ذلك فيعطى معامل الاحتكاك وفق الجدول التالي:

الجدول 5.9 معامل الاحتكاك بين السيور ومواد البكرات

مادة البكرة

مادة السير	حديد فولاذ	خشب	ورق	حديد رطب	حديد مشحّم	حديد مزيت
جلد مدبوغ بالسنديان	0.25	0.30	0.35	0.20	0.15	0.12
جلد مدبوغ معدنياً	0.40	0.45	0.50	0.35	0.25	0.20
كتان أو قنب مفرّز	0.20	0.23	0.25	0.15	0.12	0.10
Balata	0.32	0.35	0.40	0.20	-	-
قطن منسوج	0.22	0.25	0.28	0.15	0.12	0.10
شعر جمل	0.35	0.40	0.45	0.25	0.20	0.15
مطاط مخشن	0.30	0.32	0.35	0.18	-	-

مادة السير	حديد فولاذ	خشب	ورق	حديد رطب	حديد مشحّم	حديد مزيت
مطاط مغطى	0.32	0.35	0.38	0.15	-	-
مطاط مع نسيج	0.35	0.38	0.40	0.20	-	-

وتعطى معادلات الاستطاعة المنقولة لكل صنف من أصناف السيور V بالجدول التالي:

الجدول 5.10

القيمة العظمى للقطر de في المعادلة mm	المعادلة	رمز مقطع السير
125	$kW=(0.61v^{-0.09}-\frac{26.68}{d_e}-1.04\times10^{-4}v^2)\times0.7355v$	A
175	$kW=(1.08v^{-0.09}-\frac{69.68}{d_e}-1.78\times10^{-4}v^2)\times0.7355v$	B
300	$kW=(2.01v^{-0.09}-\frac{194.8}{d_e}-3.18\times10^{-4}v^2)\times0.7355v$	C
425	$kW=(4.29v^{-0.09}-\frac{690}{d_e}-6.48\times10^{-4}v^2)\times0.7355v$	D
700	$kW=(6.22v^{-0.09}-\frac{1294}{d_e}-9.59\times10^{-4}v^2)\times0.7355v$	E

حيث KW = الاستطاعة المنقولة العظمى بالكيلو واط وعند قوس تماس بمقدار 180° لسير بطول وسطي.

v = سرعة السير، m/s.

$de = d.k_d$ = القطر الخطوي المكافئ، mm.

d = القطر الخطوي للبكرة الصغرى، mm.

K_d = عامل صغر القطر يؤخذ من الجدول التالي:

الجدول 5.11 عامل صغر القطر K_d

K_d	مجال نسبة السرع	K_d	مجال نسبة السرع	K_d	مجال نسبة السرع
1.10	1.341 to 1.429	1.05	1.110 to 1.142	1.00	1.000 to 1.019
1.11	1.430 to 1.562	1.06	1.143 to 1.178	1.01	1.020 to 1.032
1.12	1.563 to 1.814	1.07	1.179 to 1.222	1.02	1.033 to 1.055
1.13	1.815 to 2.948	1.08	1.223 to 1.274	1.03	1.056 to 1.081
1.14	2.949 and over	1.09	1.275 to 1.340	1.04	1.082 to 1.109

عدد السيور المطلوبة:

$$\text{عدد السيور } n' = \frac{PK_s}{(KW)K_L K_a}$$

حيث

P = الاستطاعة المنقولة.

K_s = عامل تصحيح يعتمد على ظروف التشغيل يؤخذ من المراجع الهندسية.

K_L = عامل تصحيح يعتمد على طول السير يؤخذ من المراجع الهندسية.

K_a = عامل تصحيح يتعلق بزاوية التماس بين السير والبكرة ويؤخذ من المراجع الهندسية.

K_w – الاستطاعة التي يستطيع السير نقلها ويؤخذ من المراجع الهندسية كتابع لصنف السير والقطر الخطوي المكافئ.

تعطى المسافة بين مركزي البكرتين بالعلاقة:

$$C = A + \sqrt{(A^2 - B)}$$

حيث

$$A = \frac{L}{4} - \frac{\pi(D + d)}{8}$$

$$B = \left[\frac{D - d}{8}\right]^2$$

d – القطر الخطوي للبكرة الصغرى.

D – القطر الخطوي للبكرة الكبرى.

كما ويعطى طول السير الخطوي بالعلاقة:

$$L = 2C + 1.57(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4C}$$

السلاسل الاسطوانية الدوارة

تعطى السرعة الوسطى للسلسلة بالعلاقة:

$$V = \frac{pNn}{12}$$

حيث

V – السرعة المتوسطة ft/min.

P – خطوة السلسلة، in (cm).

N − عدد دورات البكرة المسننة بالدقيقة، rpm.

n − عدد أسنان البكرة المسننة.

كما ويمكن إيجاد الطول التقريبي للسلسلة عبر تطبيق العلاقة:

$$L = \frac{n_1 + n_2}{2} + \frac{2C}{p} + \frac{p(n_1 + n_2)^2}{39.5C}$$

حيث

L − طول السلسلة مقدرة بالوصلات.

n_1, n_2 − عدد أسنان الدولابين المسننين.

C − المسافة المركزية، in (cm).

P − خطوة السلسلة، in (cm).

وتعطى الاستطاعة المنقولة بالسلسلة مقدرة بالحصان وفق العلاقة:

$$hp = \frac{F_a V}{33{,}000}$$

حيث

F_a − قوة الشد المسموح بها في السلسلة lb (Kg).

V − سرعة السلسلة، ft/min (m/min).

بإهمال القوة الطاردة المركزية والتي يمكن إهمالها عند العمل بالسرعات المعقولة، نرى بأن المعادلة الأشهر التي تحدد قوة الشد المسموح بها في السلاسل تعطى بالعلاقة:

$$F_a = \frac{2{,}600{,}000A}{V + 600}$$

حيث

A = مساحة مقطع وتد الوصل، in^2 (cm^2).

تعطى جميع أبعاد السلسلة القياسية كتوابع لخطوها، كما تعطى مساحة وتد الوصل بالعلاقة:

$$A = 0.273p^2$$

وتعطى القيم القياسية لخطوات السلاسل كما يلي:

$$\tfrac{1}{4}, \tfrac{3}{8}, \tfrac{1}{2}, \tfrac{5}{8}, \tfrac{3}{4}, 1, 1\tfrac{1}{4}, 1\tfrac{1}{2}, 1\tfrac{3}{4}, 2, 2\tfrac{1}{2}\,in$$

السلاسل الصامتة (سلاسل ذات حلقات مفلطحة متناوبة مع مسامير الربط)

تعطى الاستطاعة المنقولة بالحصان البخاري وفق العلاقة:

$$hp = \frac{T_p V W}{33{,}000}$$

حيث

T_p = الشد المسموح به، lb/in.

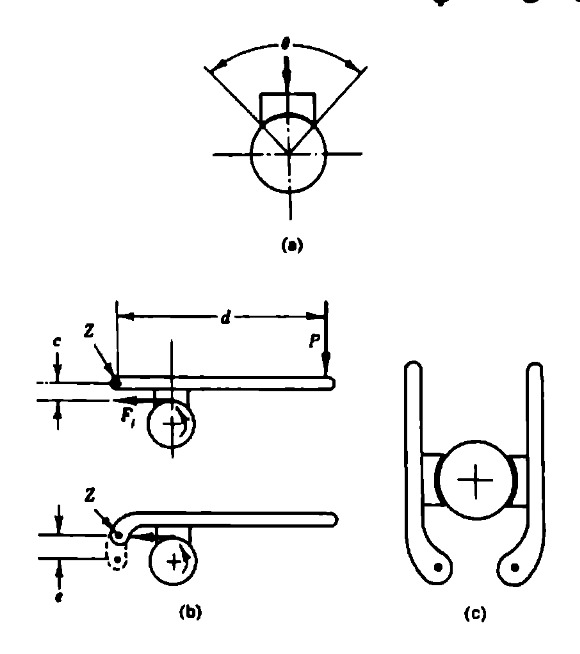
v = السرعة، (m/mi n)

W = عرض السلسلة، in (cm).

يجب أن تكون قدرة السلسلة الكلية أكبر من القدرة الاسمية الواجب نقلها، وتختلف الكمية الإضافية بحسب التطبيق. فإذا كان هناك صدم بسيط فيجب أن تكون قدرة السلسلة أكبر بمرتين من القدرة الاسمية.

المكابح ذات اللقم

تتألف المكابح ذات اللقم بأبسط أشكالها من كتلة خشنة (لقمة) تضغط على المحور كمـــا هو مبين في الشكل 5.28 وتعرّف القوة المنتقلة إلى اللقمة بالاحتكاك بقوة الاحتكاك وتعطى كما يلي:



الشكل 5.28 a) كابح لقم بسيط
b) مخطط القوى لكابح لقم
c) كابح بلقمتين

$$F_f = f F_n$$

حيث

F_f = قوة الاحتكاك، lb (N).

f = عامل الاحتكاك.

F_n = الحمل المطبق من اللقمة على الاسطوانة أو المحور الدوار، lb (N).

ويمكـــن اعتبار هذه القوة كمقاومة تبديها اللقمة لتأثير دوران الاسطوانة، ويعطى العزم المقاوم بالعلاقة:

$$T = F_f r$$

أو

$$T = f F_n r$$

حيث

T = العزم المقاوم، lb.in (N.m).

r = نصف قطر الاسطوانة أو المحور، in (mm).

يمكـــن اســـتخدام المعادلة السابقة للقم الطويلة ذات زاوية التماس (الزاوية θ في الشكل 5.28a) أقل من 60°. أما إذا كانت زاوية التماس أكبر من ذلك فإن الضغط سيتم بتوزيع غير منتظم. وننصحك باستخدام العلاقة:

$$T = \frac{4 f F_n r \sin(\theta/2)}{\theta + \sin\theta}$$

حيث

θ = زاوية التماس، rad.

وسنورد فيما يلي ثلاث حالات لتوضع الكابح ذو اللقم حيث:

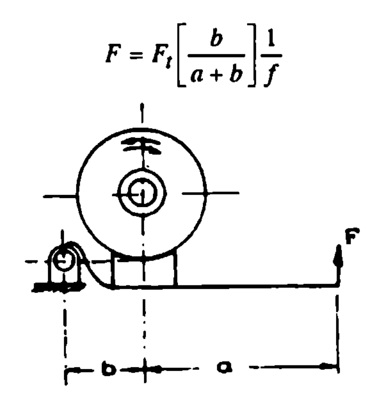
F - القوة في نهاية ذراع الكابح، N (Kgf).

F_t - القوة المماسية عند إطار حلقة دولاب الكابح، N (Kgf).

f - عامل الاحتكاك بين اللقمة ودولاب الكابح.

للدوران في كلا الاتجاهين:

$$F = F_t\left[\frac{b}{a+b}\right]\frac{1}{f}$$



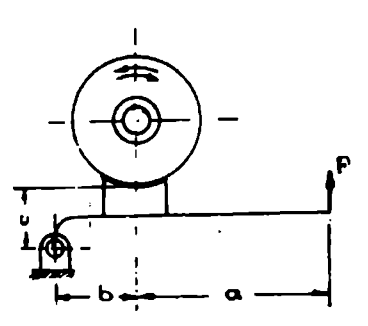
الشكل 5.29

دوران مع عقارب الساعة الشكل 5.30:

$$F = \frac{F_t b}{a+b}\left(\frac{1}{f} - \frac{c}{b}\right)$$

دوران بعكس عقارب الساعة:

$$F = \frac{F_t b}{a+b}\left(\frac{1}{f} + \frac{c}{b}\right)$$



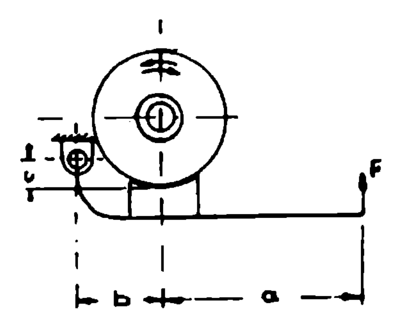
الشكل 5.30

دوران مع عقارب الساعة وفق الشكل 5.31:

$$F = \frac{F_t b}{a+b}\left(\frac{1}{f} + \frac{c}{b}\right)$$

دوران بعكس عقارب الساعة:

$$F = \frac{F_t b}{a+b}\left(\frac{1}{f} - \frac{c}{b}\right)$$



الشكل 5.31

الكوابح ذات السيور

يتألف الكابح ذو السير من سير فولاذي مبطن بمادة احتكاكية كما في الشكل 5.32.

وتعتبر القوة المطبقة قادرة على تثبيت السير حول الاسطوانة الدوارة، ويمثل الفرق بين القوتين F_1 وF_2 قوة الاحتكاك، وبنفس الأسلوب يمثل ذلك الفرق القوة المطبقة من السير. يعطى عزم الكبح بالعلاقة التالية:

$$T = r\,(F_1 - F_2)$$

حيث

r = نصـــف قطر الاسطوانة المكبوحة، in (mm). كما ويمكن إيجاد قوى الشد من العلاقة:

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\theta f}$$

و

$$F_1 = rbp_a$$

حيث

e = ثابت رياضي بقيمة 2.718.

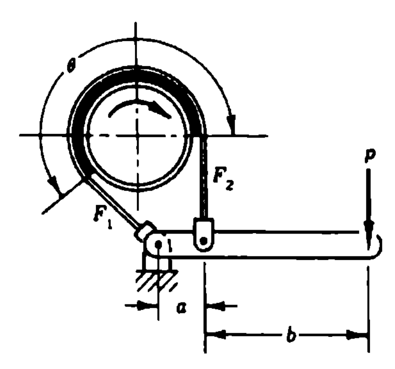
θ = زاوية التماس، rad.

b = عرض السير، in (mm).

P_a = الضغط الأعظمي المسموح به، psi (MPa).

وتحسب القوة المطلوبة لتحقيق الكبح بالعلاقة:

$$P = F_2 \frac{a}{a+b}$$



الشكل 5.32 : كابح ذو سير

وسنورد الآن العلاقات والأشكال المعبرة عن الكوابح ذات السيور البسيطة والتفاضلية:

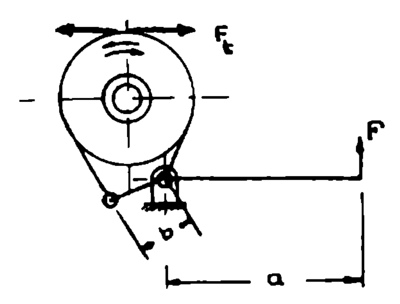
(a) كابح بسيط ذو سير:

دوران مع عقارب الساعة وفق الشكل 5.33:

$$F = \frac{bF_1}{a} = \frac{F_t b}{a}\left(\frac{e^{f\theta}}{e^{f\theta}-1}\right)$$

دوران بعكس عقارب الساعة:

$$F = \frac{bF_2}{a} = \frac{F_t b}{a}\left(\frac{1}{e^{f\theta}-1}\right)$$



الشكل 5.33

(b) كابح بسيط ذو سير انظر الشكل 5.34:

دوران مع عقارب الساعة:

$$F = \frac{bF_2}{a} = \frac{F_t b}{a}\left(\frac{1}{e^{f\theta} - 1}\right)$$

دوران بعكس عقارب الساعة:

$$F = \frac{bF_1}{a} = \frac{F_t b}{a}\left(\frac{e^{f\theta}}{e^{f\theta} - 1}\right)$$

الشكل 5.34

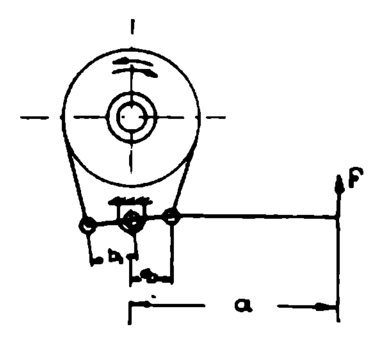
(c) كابح تفاضلي:

دوران مع عقارب الساعة:

$$F=\frac{b_2F_1-b_1F_2}{a}=\frac{F_t}{a}\left(\frac{b_2e^{f\theta}-b_1}{e^{f\theta}-1}\right)$$

دوران بعكس عقارب الساعة:

$$F=\frac{b_2F_2-b_1F_1}{a}=\frac{F_t}{a}\left(\frac{b_2-b_1e^{f\theta}}{e^{f\theta}-1}\right)$$



الشكل 5.35 كابح تفاضلي

وســـنورد في نهاية هذه الفقرة جدولاً يبين قيم الحد $e^{f\theta}$ لأنواع مختلفة من السيور والبكرات.

الفاصل الواصل

الفاصل الواصل القرص

يبين الشكل 5.36 فاصلاً واصلاً قرصياً. يثبت الجزء A مع محور، بينما يربط الجزء B مـــع محـــوره عبر خابور، ويثبت الوجه C على الجزء B. وعندما يُدفع الجزء B لـــيواجه الجزء A يحقق الوصل، وإذا أبعد عن الجزء A فسيحدث عندها الفصل، وبفـــرض D و d قطري الوجهين، وبسبب عدم فاعلية تطابق وجه مع محور دوار فنادراً ما يكون d أقل من $\frac{1}{2}D$.

يعتمد تصميم الفاصل الواصل على فرضية أن الضغط سيكون موزعاً بشكل منتظم وســيكون التآكل منتظماً ولكنها ليست الحالة الحقيقية. وتعطى العلاقة الأنجح في هذه الحالة بالشكل:

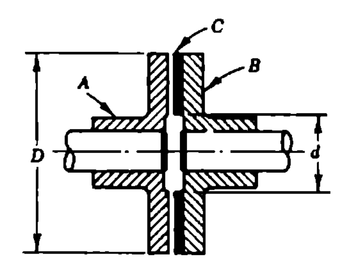
$$T = \frac{fP(D+d)}{4}$$

حيث

T = العزم المنقول، lb.in (N.m).

P = الحمل المحوري، lb (N).

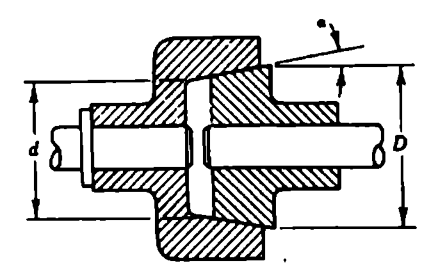
f = عامل الاحتكاك.



الشكل 5.36 : فاصل واصل قرصي

الفاصل الواصل المخروطي

يعتـــبر الفاصل الواصل المخروطي والمبين في الشكل 5.36 فاصلاً واصلاً احتكاكياً بسيطاً يملك ميزة هامة وهي أن أي قوة محورية بسيطة ستنتج قوة ضغط كبيرة على سطح الاحتكاك. يجب أن لا تقل الزاوية α عن 8° كما أنها عادةً لا تتجاوز 15°، ويمكن إيجاد العزم المنقول من المعادلة السابقة مع إدخال تأثير الزاوية كما يلي:



الشكل 5.37 : فاصل واصل مخروطي

$$T = \frac{fP(D + d)}{4\sin\alpha}$$

حيث

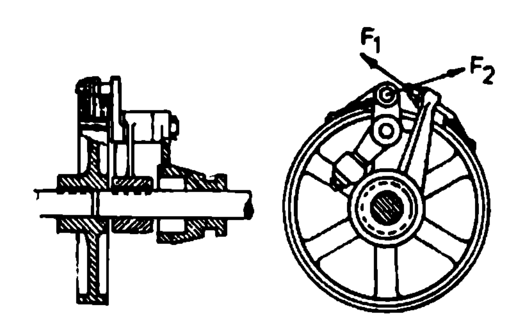
f = معامل الاحتكاك، بينما بقية الرموز موضحة على الشكل 5.37.

الفاصل الواصل ذو السير

تعطى النسبة بين قوتي الشد على طرفي السير (القشاط):

$$F_1/F_2 = e^{f\theta}$$

وتؤخذ قيمة الحد $e^{f\theta}$ من الجدول الوارد في نهاية هذه الفقرة.



الشكل 5.38 الفاصل الواصل ذو السير

ويعطى العزم المنقول بالعلاقة:

$$T = (F_1 - F_2)\,r$$

حيث

F_1 = قوة الشد العظمى في السير، N (Kgf).

F_2 = قوة الشد على الطرف الثاني من السير، N (Kgf).

r = نصف قطر اسطوانة الاحتكاك، (mm).

θ = قوس التماس، rad.

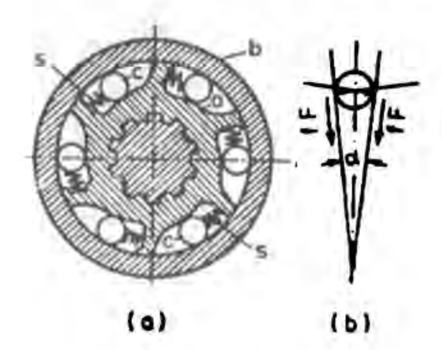
كما ويعطى الضغط الاسمي الأعظمي بالعلاقة:

$$P_{max} = \frac{F_1}{br}$$

حيث

b = عرض السير، mm.

الفاصل الواصل ذو المدحرجات الاسطوانية



الشكل 5.39 الفاصل الواصل ذو المدحرجات الاسطوانية

قوة حشر المدحرجة

$$F = Ft/\tan \alpha$$

العزم المنقول

$$T = \frac{1}{2} F_t . D$$

حيث

F_t – القوة المماسية الضرورية لنقل العزم عند القطر الخطوي D.

α – الزاوية بين مماسي منحني الكامة والغطاء عند نقاط التماس مع المدحرجة.

$$\alpha < 2\,\phi$$

حيث

$$\tan \phi = f = 0.03 \rightarrow 0.05$$

تتراوح القيمتان السابقتان بين السطوح الفولاذية الخشنة والمصقولة.

ويعطى الحمل المسموح به من أجل i' مدحرجة بالعلاقة:

$$F \leq i' \sigma_b k l d$$

حيث

l - طول المدحرجة الاسطوانية، mm.

σ_b - إجهاد الحشر المسموح به، $MN/m^2\ (Kgf/mm^2)$ $= (105)\ 1030$ من أجل الفولاذ الكرومي عالي القساوة فيه 0.85 % C.

$k = \frac{4.64}{E}\sigma_b$ - معامل استوائية المدحرجة.

d - قطر المدحرجة mm وتؤخذ عادةً $d = 0.1\,D \rightarrow 0.15\,D$

الجدول 5.12 قيم الحد $e^{f\theta}$

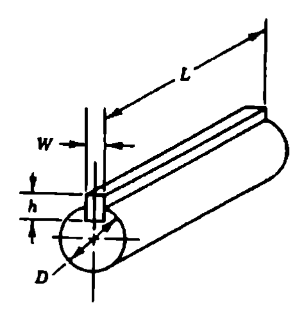
نسبة زاوية التماس إلى زاوية المحيط $\frac{\theta}{2\pi}$	سير فولاذي على حديد الصب $f = 0.18$	سير جلدي على			
		خشب		حديد صب	
		قليل التشحيم $f = 0.47$	مشحّم كثيراً $f = 0.12$	قليل التشحيم $f = 0.28$	بلل، رطوبة $f = 0.38$
0.1	1.12	1.34	1.08	1.19	1.27
0.2	1.25	1.81	1.16	1.42	1.61
0.3	1.40	2.43	1.25	1.69	2.05
0.4	1.57	3.26	1.35	2.02	2.60
0.425	1.62	3.51	1.38	2.11	2.76
0.45	1.66	3.78	1.40	2.21	2.93
0.475	1.71	4.07	1.43	2.31	3.11

نسبة زاوية التماس إلى زاوية المحيط $\frac{\theta}{2\pi}$	سير فولاذي على حديد الصب f = 0.18	سير جلدي على			
		خشب		حديد صب	
		قليل التشحيم f = 0.47	مشحّم كثيراً f = 0.12	قليل التشحيم f = 0.28	بلل، رطوبة f = 0.38
0.500	1.76	4.38	1.46	2.41	3.30
0.525	1.81	4.71	1.49	2.52	3.50
0.6	1.97	5.88	1.57	2.81	4.19
0.7	2.21	7.90	1.66	3.43	5.32
0.8	2.47	10.60	1.83	4.09	6.75
0.9	2.77	14.30	1.97	4.87	8.57
1.0	3.10	19.20	2.12	5.81	10.90

الخوابير

يعطى العزم المطبق على الخابور وفق الشكل بالعلاقة:

$$T = WLs_S \times \frac{D}{2}$$



الشكل 5.40 أبعاد الخابور

حيث

T = العزم، lb.in (N.m).

L = طول الخابور، in (cm).

W = عرض الخابور، in (cm).

h = ارتفاع الخابور، in (cm).

D = قطر المحور، in (cm).

S_s = إجهاد القص، psi (MPa).

S_c = إجهاد الضغط، psi (MPa).

وأيضاً يمكن إيجاد العزم بالعلاقة:

$$T = \frac{h}{2} \times Ls_c \times \frac{D}{2}$$

حيث

$$s_c = \frac{4T}{hLD}$$

تصـــمم الخوابير عادةً بحيث تنهار أو تتحطم قبل انهيار المحور أو البطيخة (حاوية المحـــور) وذلـــك بسبب سهولة وقلة كلفة تبديل الخابور. يجب أن يكون ارتفاع الخابور حوالي ربع قطر المحور D.

وسنورد فيما يلي جدولاً يبين أبعاد الخوابير تابعةً لقطر المحور.

CHAMFER OR RADIUS OF KEY

KEYWAY RADIUS IN SHAFT AND HUB

أبعاد الخوابير المتوازية والأخاديد

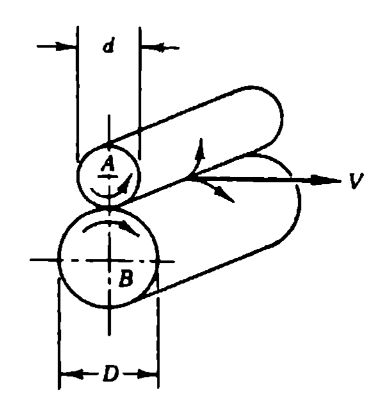
(كل الأبعادبالميليميتر)

من أجل أقطار المحور	فوق	6	8	10	12	17	22	30	38	44	50	58	65	75	85	95	110	130	150	170	200	230	260	290	330	380	400
	حتى	8	10	12	17	22	30	38	44	50	58	65	75	85	95	110	130	150	170	200	230	260	290	330	380	400	500
مقطع الخابور	العرض b	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28	32	36	40	45	50	56	63	70	80	90	100
	الارتفاع h	2	3	4	5	6	7	8	8	9	10	11	12	14	14	16	18	20	22	25	28	32	32	36	40	45	50
عمق الأخدود	ضمن المحور (الاسمي) t_1	1.2	1.8	2.5	3	3.5	4	5	5	5.5	6	7	7.5	8.5	9	10	11	12	13	15	17	19	20	22	25	28	31
	ضمن البطيخة t_2	1	1.4	1.8	2.3	2.8	3.3	3.3	3.3	3.8	4.3	4.4	4.9	4.9	5.4	6.4	7.4	8.4	9.4	10.4	11.4	12.4	13.4	14.4	15.4	17.4	19.5
السماح في عمق الأخدود	t_1	+0.1					+0.2									+0.3											
	t_2	+0.1								+0.2												+0.3					
مقدار الشطف أو نصف القطر للخابور r_1	قيمة عظمى		0.25				0.35			0.55					0.80					1.30			2.00			2.95	
	قيمة دنيا		0.16				0.25			0.40					0.60					1.00			1.60			2.50	
نصف ق الأخدود r_2	قيمة عظمى		0.16				0.25			0.40					0.60					1.00			1.60			2.50	
طول الخابور L	دنيا	6	6	8	10	14	18	22	28	36	45	50	56	63	70	80	90	100	110	125	140	160	180	200	220	250	280
	عظمى	20	36	45	56	70	90	110	140	160	180	200	220	250	280	320	360	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400

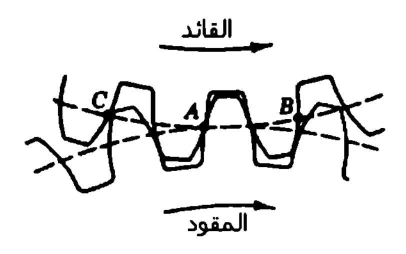
وهناك أنواع أخرى للخوابير مثل الخوابير ذات الرؤوس والخوابير التي على شكل نصف اسطوانة (خابور وودروف).

المسننات

تملك النقطتان الموجودتان على كلٍّ من الاسطوانتين المبينتين في الشكل 5.41 نفس السرعة الخطية إذا افترضنا عدم وجود انزلاق. وهذا بالتالي يعني أن:



الشكل 5.41 اسطوانتي احتكاك



الشكل 5.42 أسنان المسننين في حالة التشابك

عدد دورات المسنن d × A = عدد دورات المسنن D × B.

ولنمــــنع أي انزلاق بين الاسطوانتين فمن الأفضل وضع أسنان على الاسطوانتين دون تغــيير القطــرين الفعّالين كما هو مبين في الشكل 5.42، حيث يدل الخطان المــنقطان على سطحي الاسطوانتين المبينتين في الشكل 5.41. وبالتالي فإن إضافة المسننات لن تغير المعادلة السابقة.

معادلات المسنن المستقيم

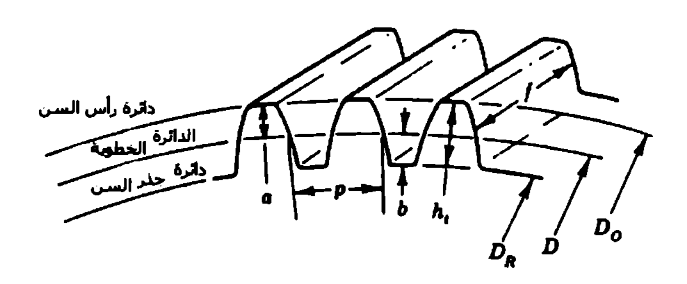
تطبق المعادلات التالية على كلا نوعي المسننات المستقيمة ذات زاوية الضغط 20° أو 14.5°، وتكون الأبعاد مقدرة بالإنش أو بالسنتيمتر.

الدائرة الخطوية: وهي دائرة وهمية ممثلة بخط متقطع في الشكل 5.44.

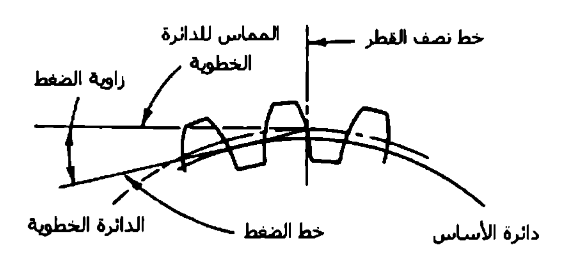
القطر الخطوي D: وهو قطر الدائرة الخطوية، وعند ذكر قطر المسنن فإننا نعني قطر الدائرة الخطوية هذا.

عدد الأسنان: عدد أسنان المسنن.

الخطوة القطرية P: عدد الأسنان في المسنن لكل إنش من القطر الخطوي، P = n/D. وإذا ذكرنا خطوة المسنن فإننا نعني الخطوة القطرية.



الشكل 5.43 تسميات المسنن المستقيم



الشكل 5.44 زاوية الضغط

ارتفاع رأس السن a: ويمثل المسافة القطرية بين الدائرة الخطوية ودائرة رأس المسنن، $a = 1/P$.

عمق قعر السن b: وهو المسافة القطرية بين الدائرة الخطوية وقعر فراغ السن، $b = 1.157/P$.

القطر الخارجي D_o: وهو قطر دائرة رأس السن:

$$D_o = D + 2a$$

وأيضاً

$$D_o = (n + 2)/P$$

قطر الجذر D_R: وهو قطر دائرة جذر السن، $D_R = D - 2b$.

العمق الكامل h_t: ويدعى بالارتفاع الكلي، $h_t = a + b$.

عرض الوجه f: وهو عرض سن المسنن.

الخطوة الدائرية p: وهي المسافة على محيط الدائرة الخطوية بين نقطة من سن والنقطة المماثلة لها من السن اللاحق.

$$p = \pi D/n$$

وبما أن $P = n/D$ فإن:

$$\pi = pP$$

العمق الفعّال (العامل) h_k: المسافة التي يتداخل فيها رأس السن لأحد المسننين مع رأس السن المقابل من أسنان المسنن الآخر، $h_k = 2a$.

السماكة الدائرية t_c: سماكة المسنن مقاسة على محيطة الدائرة الخطوية، $t_c = p/2$.

حمل القدرة ـ السرعة

تولّد القدرة المنقولة عبر المسنن الأول قوة على المسنن الثاني تعطى بالعلاقة:

$$F = \frac{33{,}000hp}{V}$$

حيث

F = القوة على سن المسنن، lb (Kg).

h_p = الاستطاعة المنقولة بالحصان البخاري.

V = السرعة عند الدائرة الخطوية، ft/min (m/min).

وتعطى السرعة عند الدائرة الخطوية بالعلاقة:

$$V = 0.262DN$$

حيث

N = سرعة الدوران، rpm.

متانة المسنن

تعتمد قدرة المسنن على نقل الاستطاعة على متانة السن باعتباره دعامة موثوقة من طرفها، ويعطى الحمل المسموح به بالعلاقة:

$$F_s = \frac{sfY}{P}$$

حيث

F_s = الحمل المسموح به، lb (Kg).

s = الإجهاد المسموح به، psi (MPa).

Y = عامل شكل السن.

يمكــن إيجـاد الإجهاد المسموح به وعامل شكل السن من المخططات والجداول الموجودة في المرجع الهندسية.

ولأخذ حمولات الصدم وأخطاء التصنيع بعين الاعتبار يجب ضرب المعادلة السابقة بعامــل K. ويعطى العامل K للمسننات ذات الجودة التجارية وعند السرعة على الأقل من 2000 ft/min (610 m/min) بالعلاقة:

$$K = \frac{600}{600 + V}$$

أما من أجل المسننات المنسوخة بدقة، وإذا كانت السرعة أقل من 4000 ft/min (1219 m/min) فيحسب العامل K وفق العلاقة:

$$K = \frac{1200}{1200 + V}$$

ومن أجل المسننات ذات الدقة العالية والمجلخة العاملة تحت سرعات أكبر من 4000 ft/min (1219 m/min) فيعطى عندها العامل K بالعلاقة:

$$K = \frac{78}{78 + \sqrt{V}}$$

الفوت (Backlash)

يقّـــدر خلوص الفوت لمعظم المسننات بحوالي 0.04/P، وتعطى القوة القادرة على فصل مسننين معشقين ومحملين بالعلاقة:

$$S = F \tan \alpha$$

حيث

S = قوة الفصل، lb (N).

α = زاوية ضغط السن.

وسنورد فيما يلي جدولاً يعطي المودولات الموصى بها للمسننات المستقيمة والمائلة:

الجدول 5.13 المجموعات المقترحة للمودولات (mm)

المفضّلة (1)	الخيار 2 (2)	الخيار 3 (3)	المفضّلة (1)	الخيار 2 (2)	الخيار 3 (3)
1			8	7	(6.5)
1.25	1.25		10	9	
1.5	1.375		12	11	
2	1.75		16	14	
2.5	2.25		20	18	
3	2.75	(3.25)	25	22	
4	3.5		32	28	
5	4.5	(3.75)	40	36	
6	5.5		50	45	

وســـنورد الآن جدولاً بالقيم المقترحة والموصى بها لقيم الخطوة القطرية للمسننات المستقيمة والمائلة، ويجب أن نأخذ قيم العمود الأول (المفضّل) قدر ما نستطيع:

الجدول 5.14 المجموعات المقترحة للخطوة القطرية

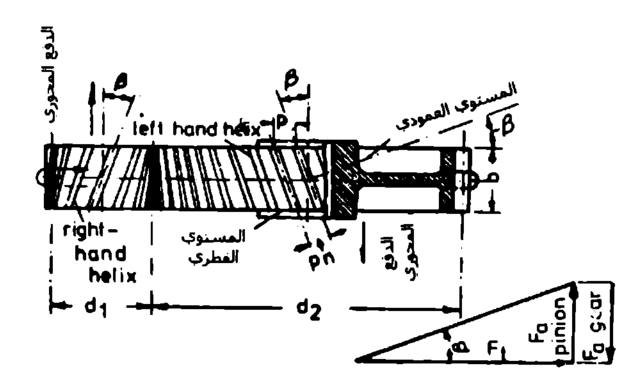
المفضّلة	الخيار 2
20	
16	18
12	14
10	11
8	9
6	7
5	5.50
4	4.50
3	3.50
2.50	2.75
2	2.25
1.50	1.75
1.25	
1	
0.75	0.875
0.625	
0.50	

أما الآن فسنورد جدولاً يعطي نسبة النقل القياسية للمسننات i:

الجدول 5.15 نسبة المسننات القياسية $\left(i = \frac{Z_2}{Z_1}\right)$

مرحلة التخفيض					
أولى	ثانية	ثلاثية	أولى	ثانية	ثلاثية
1.25	8	40	4.0	22.4	125
1.40	9	45	4.5	25	140
1.60	10	50	5.0	28	160
1.80	11	56	5.6	31.5	180
2.00	12	63	6.3	35.5	200
2.24	12.5	71	7.1	40	250
2.50	14	80	8.0	45	280
2.80	16	90	9.0	50	315
3.15	18	100	-	-	355
3.55	20	112	10	-	400

المسننات المائلة (Helical Gear)



الشكل 5.45 المسننات المائلة

الخطوة الدائرية العمودية

$$P_n = P\cos\beta = \frac{\pi d}{z}\cos\beta = \pi m\cos\beta$$

الخطوة القطرية العمودية

$$P_n = \frac{P}{\cos\beta} = \frac{z}{d\cos\beta}$$

المودول العمودي

$$m_n = m.\cos\beta = \frac{d}{z}\cos\beta$$

عدد الأسنان

$$z = \frac{d\cos\beta}{m_n} = d.P_n\cos\beta$$

قطر الدائرة الخطوية

$$d = \frac{z}{P} = z\,m = \frac{z}{P_n \cos\beta} = \frac{z\,m_n}{\cos\beta}$$

قطر دائرة القعر

$$d_r = d - 2\,(t_{fn} + t_{cn} - K'_n)\,m_n$$

حيث

$$t_{fn} = t_f/\cos\beta$$

$$t_{cn} = t_c/\cos\beta$$

$$K'_n = K'/\cos\beta$$

دائرة الرأس أو القطر الخارجي

$$d_o = d_r + 2h$$

h ارتفاع المسنن

ويعطى الدفع المحوري بالعلاقة

$$F_a = F_t \,.\, \tan\beta$$

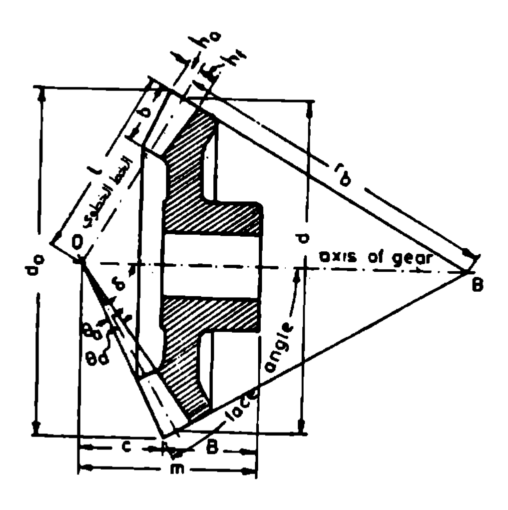
ويعطى عرض المسنن ذو الأسنان المائلة وفق علاقة Fellow التجريبية:

$$b = \frac{(1.1)\pi m}{\tan\beta} = \frac{1.1\pi m_n}{\sin\beta}$$

ويمكن إيجاد عرض المسنن أيضاً بحيث

$$b = 12.5\,m_n \quad \text{to} \quad 20\,m_n$$

المسننات المخروطية



الشكل 5.46 تعاريف وأبعاد المسنن المخروطي

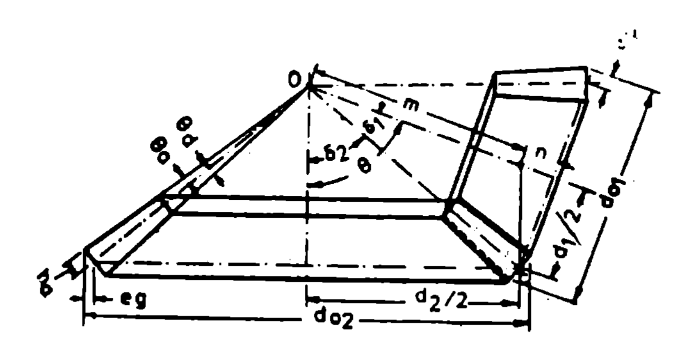
الجدول 5.17 خصائص السن المخروطي

العناصر	الرمز	المسنن	المسنن الصغير
العمق الاسمي للرأس	h_a	m	m*
العمق الاسمي للقعر	h_f	1.157 m	1.157 m*
عمق السن الكلي	h	2.157 m	2.157 m
زاوية الرأس	θ_a	m/L	m/L
زاوية العمق	θ_d	$\frac{1.157\,m}{L}$	$\frac{1.157\,m}{L}$

* عمق القعر للمسنن الكبير يساوي عمق الرأس للمسنن الصغير وكذلك عمق رأس المسنن الصغير يساوي عمق المسنن الكبير لخط الخطوة المشترك. سيكون عمق رأس السن للمسنن الصغير أكبر من عمق قعره

علاقات الزوايا:

a) المسننان المخروطيان ذوا الزاوية الحادة:



الشكل 5.47 مسننات مخروطيان بزاوية حادة

الزاوية الخطوية للمسنن الصغير:

$$\tan \delta_1 = \frac{d_1 . \sin\theta}{d_2 + d_1 \cos\theta} = \frac{\sin\theta}{\frac{z_2}{z_1} + \cos\theta} = \frac{\sin\theta}{i + \cos\theta}$$

الزاوية الخطوية للمسنن الكبير:

$$\tan \delta_2 = \frac{d_2 . \sin\theta}{d_1 + d_2 \cos\theta}$$

$$= \frac{\sin\theta}{\frac{z_1}{z_2} + \cos\theta}$$

$$= \frac{\sin\theta}{\frac{1}{i} + \cos\theta}$$

الزاوية المحددة للرأس:

$$\tan\delta_a = \frac{2h_{a1}\sin\delta_1}{d_1}$$

$$= \frac{2h_{a2}\sin\delta_2}{d_2}$$

الزاوية المحددة للقعر:

$$\tan\theta_d = \frac{2h_{f1}\sin\delta_1}{d_1}$$

$$= \frac{2h_{f2}\sin\delta_2}{d_2}$$

حيث

h_{a1}, h_{a2} = عمق الرأس للمسنن الصغير والكبير على التوالي، mm.

h_{f1}, h_{f2} = عمق القعر للمسنن الصغير والكبير على التوالي، mm.

القطر الخارجي للمسنن الصغير =

$$d_{o1} = d_1 + 2\,h_{a1} \,.\, \cos\delta_1$$

القطر الخارجي للمسنن الكبير =

$$d_{o2} = d_2 + 2\,h_{a2} \,.\, \cos\delta_2$$

b) المسننان المخروطيان المتعامدان:

الزاوية الخطوية للمسنن الصغير

$$\tan\delta_1 = \frac{d_1}{d_2} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{1}{i}$$

الزاوية الخطوية للمسنن الكبير

$$\tan\delta_2 = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} = i$$

خصائص المسننات المخروطية بحدود مكافئة للمسنن المستقيم.

قطر الدائرة الخطوية المكافئة

$$d_e = d/\cos\delta$$

قطر الدائرة الخارجية المكافئة

$$d_{oe} = d_o/\cos\delta$$

نسبة المسنن المكافئة

$$i_e = i^2$$

الأسنان المكافئة أو عدد الأسنان لمسننات مخروطية مستقيمة

$$z_e = z/\cos\delta$$

عرض وجه المسنن

$$b \geq 6\ m$$

$$b \leq 10\ m$$

$$b \leq L/3$$

حيث

L هي المسافة المخروطية

$$L = \frac{1}{2}\sqrt{d_1^2 + d_2^2} = \frac{d_2}{2\sin\delta_2} = \frac{d_1}{2\sin\delta_1}$$

حيث

d_1 و d_2 القطرين الخطويين على القطر الكبير للمسنن الكبير والصغير على التوالي.

وسنورد الآن جدولاً يبين المجموعة المقترحة لمودولات المسننات المخروطية وكذلك الخطوة القطرية:

الجدول 5.17 المودولات المقترحة للمسننات المخروطية

المفضلة	الخيار 2
1	
1.25	1.125
1.5	1.375
2	1.75
2.5	2.25
3	2.75
4	3.5
5	4.5
6	5.5
8	7
10	9
12	11
16	14

المفضلة	الخيار 2
20	18
25	22
32	28
40	36
50	45

الجدول 5.18 القيم المقترحة للخطوة القطرية للمسننات المخروطية

المفضلة	الخيار 2
20	
16	
12	18
10	14
8	11
6	9
5	7
4	5.50
3	4.50
2.50	3.50
2	2.75
1.50	2.25
1.25	1.75
1	
0.75	
0.625	0.875
0.50	

براغي ACME

يعطى العزم اللازم لتطبيق قوة معينة ببرغي Acme بالعلاقة:

$$T = \frac{Qd}{2}\left(\frac{\cos\alpha \tan\lambda + \mu}{\cos\alpha - \mu \tan\lambda}\right)$$

حيث

T = العزم، lb.in (N.m).

Q = الحمل أو القوة، lb (N).

d = القطر الخطوي، in (mm).

λ = زاوية التحميل.

μ = معامل الاحتكاك.

ويعطى العزم المطلوب تطبيقه للتغلب على الاحتكاك عند الجلبة الدافعة بالعلاقة:

$$T_c = \frac{\mu Q d_c}{2}$$

حيث

T_c = العزم، lb.in (N.m).

d_c = القطر الوسطي للجلبة الدافعة، in (mm).

ويعطى عامل الاحتكاك لجلبة فولاذية على مدحرجة برونزية دافعة حوالي 0.1 عند البداية و0.08 أثناء التشغيل. إذا تم استخدام مدحرجة ذات كرات لعملية الدفع فسيصبح الاحتكاك صغيراً جداً بالنسبة للاحتكاك مع البرغي وبالتالي سيهمل.

ويكون العزم الكلي المطلوب لتحقيق القوة Q عبارة عن مجموع العزمين الموجودين في المعادلتين السابقتين.

الأعمدة في أجزاء الآلات

غالباً ما توضع الأعمدة في أجزاء الآلات لنقل الحمولات المحورية. وإذا كان الحمل المحـــوري عـــبارة عن حمل شد عندها تطبق العلاقة S = P/A، أما إذا كان الحمل المحوري حملاً مركباً فيجب عندها استخدام المعادلة المناسبة لتلك الحالة.

وتعطـــى معادلة Euler المحددة للحمولة الحرجة لأعمدة الاسطوانات ذات المقطع المنتظم كما يلي:

$$F_{cr} = \frac{C\pi^2 EA}{(L/k)^2}$$

حيث

F_{cr} = الحمل الحرج الذي يسبب الانحناء أو الالتواء.

C = معامل يعتمد على شروط التحميل (انظر المراجع الهندسية لتحديد قيمته).

E = عامل المرونة، psi.

A = مساحة مقطع العرضي، in^2.

L = طول العمود، in.

$k = \sqrt{I/A}$ نصـــف قطـــر الدوران الأصغري، حيث I = عزم العطالة الأصغري حول محور الانحناء، ويأخذ k في حالة المقطع الدائري القيمة، k = D/4، وفي حالة كـــون المقطـــع مستطيل الشكل يصبح $k = h\sqrt{3}/6$ ، حيث h هو البعد الصغير للمستطيل.

ويعطـــى الحمـــل الحرج للأعمدة متوسطة الطول ذات المقاطع المنتظمة عبر عدة معادلات، إحداها معادلة J.B.Johnson التالية:

$$F_{cr} = s_y A\left[1 - \frac{s_y (L/k)^2}{4C\pi^2 E}\right]$$

حيث Sy حد الخضوع، psi. وتملك باقي الرموز نفس المفاهيم عند استخدامها في معادلة Euler السابقة، وتعتمد قيمة المعامل C على الشروط المطبقة عند النهايات، كما في الشكل 5.48.

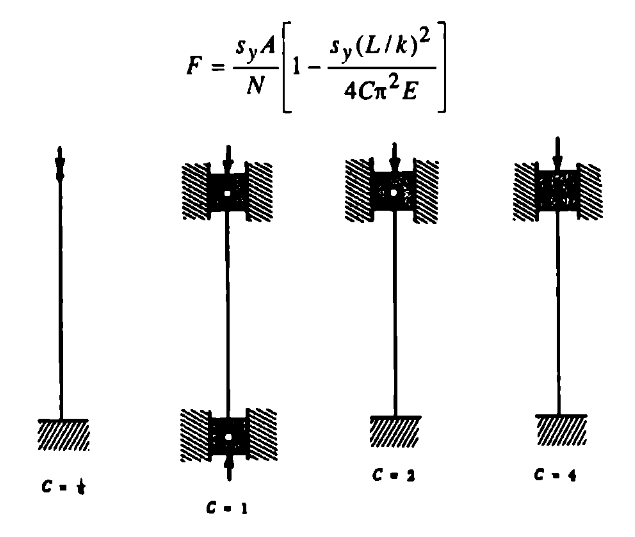
نحصـــل على الحمل الآمن عبر تقسيم الحمل الحرج على عامل الأمان N وتصبح المعادلتان كما يلي:

الحمل الآمن F وفق معادلة Euler:

$$F = \frac{F_{cr}}{N} = \frac{C\pi^2 EA}{N(L/k)^2}$$

الحمل الآمن F، وفق معادلة Johnson:

$$F = \frac{s_y A}{N}\left[1 - \frac{s_y (L/k)^2}{4C\pi^2 E}\right]$$



الشكل 5.48

الجدول 5.19

C	E, psi	S_y, psi	$(L/k)^2$	L/k
1/4	3×10^6	80.000	1.849	43
		70.000	2.113	46
		60.000	2.465	50
		50.000	2.958	54
		40.000	3.697	61
1	30×10^6	80.000	7.394	86
		70.000	8.451	92
		60.000	9.860	99
		50.000	11.832	109
		40.000	14.789	121
2	30×10^6	80.000	14.789	121
		70.000	16.902	130
		60.000	19.719	140
		50.000	23.663	154
		40.000	29.579	172

إذا كانت قيمة L/k أقل من القيمة $\sqrt{2C\pi^2 E / s_y}$ فعليك استخدام معادلة Johnson التي تقبل انخفاض النسبة حتى L/k = 0.

يمكن استنتاج النسبة L/k التي نحدد وفقها استخدام معادلة Euler أو استخدام معادلة Johnson عبر نسب الحمل الحرج من معادلة Euler على الحمل الحرج من معادلة Johnson:

$$\frac{C\pi^2 EA}{(L/k)^2} = s_y A\left[1 - \frac{s_y (L/k)^2}{4C\pi^2 E}\right]$$

بالتالي

$$L/k = \sqrt{\frac{2C\pi^2 E}{s_y}}$$

عندما تكون قيمة L/k أكبر من القيمة الناتجة من هذه العلاقة فعلينا استخدام معادلة Euler، أما إذا كانت أصغر فعلينا استخدام معادلة Johnson. ويعطي الجدول 5.1 قيم L/k وفق عدة قيم لحد الخضوع وحالة تثبيت طرفي العمود.

وثوقية عناصر الآلات والأنظمة

تعـــد الوثوقـــية خاصة من خواص العنصر، أو الأنظمة المكونة من عدة عناصر، والمعبّر عنها بقدرة ذلك العنصر على أداء مهمته ضمن بيئة محددة ولزمن محدَّد. لقد أصـــبحت تنبؤات الوثوقية فرعاً مستقلاً ومضبوطاً من فروع التقنيات الصناعية. ويـــؤدي مهندسوا الوثوقية دوراً هاماً في تقليل الأعطال المكلفة وتصحيح خطط وجداول الصيانة والإصلاح.

ملخص للمعادلات ذات الصلة بموضوع الوثوقية

من أجل نسبة عطل تناسبية ثابتة:

$$R = e^{-\lambda t}$$
$$R + Q = 1$$
$$Q = 1 - e^{-\lambda t}$$
$$N_s = N_0 e^{-\lambda t}$$
$$N_f = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

$$m = \frac{1}{\lambda}$$
$$R = e^{-t/m}$$
$$Q = 1 - e^{-t/m}$$
$$N_s = N_0 e^{-t/m}$$
$$N_f = N_0 (1 - e^{-t/m})$$

حيث

R = الوثوقية.

Q = عدم الوثوقية.

λ = نسبة العطل التناسبي (أي تناسب نسبة العطل مع N_s).

N_s = عدد العناصر الحية (الناجية أو الباقية).

N_f = عدد العناصر الميتة (المعطّلة).

N_o = العدد الابتدائي للعناصر الحية.

m = متوسط الزمن بين الأعطال (MTBF).

t = الزمن.

ونحدد قيمة m أو (MTBF) بعد إجراء عملية اختبار بالعلاقة:

$$m = \frac{\text{عدد ساعات العمل الكلية}}{\text{عدد الأعطال}}$$

ويعطى الانحراف المعياري σ لمتغير x بتوزيع طبيعي بالعلاقة:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - x_m)^2}{n}}$$

حيث

x_m هي القيمة المتوسطة لعدد عينات n من المتغير x.

تحدد القيمة المتوسطة لزمن الاهتلاك ضمن تجربة معينة بالعلاقة:

$$M = \frac{\text{مجموع العناصر الحية (غير المعطلة)}}{\text{عدد العناصر}}$$

ومن أجل متغير بتوزيع أسي نجد:

$$\text{حد الثقة العلوي} = \frac{2nm}{\chi^2_{1-\alpha/2,n}}$$

$$\text{حد الثقة السفلي} = \frac{2nm}{\chi^2_{\alpha/2,n}}$$

وإذا أخذنا مستوى ثقة معطى بالنسبة المئوية $(1 - \alpha)$ 100، حيث n تشير إلى عدد الأعطال، كما وتشير m إلى تقديرات للقيمة المتوسطة للمتغير، وχ^2 يشير إلى قيمة تربيعية (تعطى وفق جداول) تتعلق بالمتغيرين n وα أو $\alpha/2$ - 1.

وإذا كان العنصر أو الوحدة يشكل جزءاً من نظام فيمكننا كتابة:

$$\frac{m_c}{m_s} = \frac{t_c}{t_s}$$

$$m_s = \frac{m_c}{d}$$

حيث

m_c = متوسط الزمن بين الأعطال (MTBF) للعنصر خلال ساعات عمل العنصر.

m_s = متوسط الزمن بين الأعطال (MTBF) للعنصر خلال ساعات عمل النظام.

t_c = ساعات عمل العنصر.

t_s = ساعات عمل النظام.

d = دورة الخدمة = $\frac{t_c}{t_s}$.

ويُعطى احتمال حصول كلا الحدثين x و y معبراً عنها بالرمز P_{xy} بالعلاقة:

$$P_{xy} = P_x\, P_y$$

ونعبر عن احتمال حدوث أحد الحدثين x و y بالرمز P_{x+y} بالعلاقة:

$$P_{x+y} = P_x + P_y - P_x\, P_y$$

حيث

P_x = احتمال حدوث الحدث x.

P_y = احتمال حدوث الحدث y.

وتشـــير المعادلات التالية إلى الأنظمة التسلسلية والتفرعية، وتدل الرموز على نفس مفاهـــيمها في المعـــادلات السابقة مثل الوثوقية، الاحتمال، نسبة العطل، الخ. مع وجـــود دلائـــل إضـــافية إذ تشير اللاحقة s إلى التسلسلي، وتشير اللاحقة p إلى التفرعي، وتشير الأرقام .... ,1, 2, 3 إلى العناصر أو الوحدات الجزئية.

يظهر الشكل 5.49 منحنيات الوثوقية، للأنظمة التسلسلية والتفرعية.

$$R_s = R_1 R_2 \ldots$$

$$Q_s = Q_1 + Q_2 - Q_1 Q_2$$

$$Q_s = 1 - R_s$$

$$R_p = R_1 + R_2 - R_1 R_2$$

$$Q_p = Q_1 Q_2$$

$$Q_p = 1 - R_p$$

$$R_s = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \ldots.)t}.$$

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \ldots$$

$$m_s = \frac{1}{\lambda_s}$$

$$R_s = e^{-n\lambda t}$$

$$\lambda_s = n\lambda$$

$$m_s = \frac{1}{n\lambda}$$

$$R_p = R_1 + R_2 - R_1 R_2$$

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3 - R_1 R_2 - R_2 R_3 + R_1 R_2 R_3$$

$$R_p = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_3 t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} + e^{-(\lambda_2 + \lambda_3)t}$$

$$+ e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t}$$

$$m_p = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

$$m_p = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_3}$$

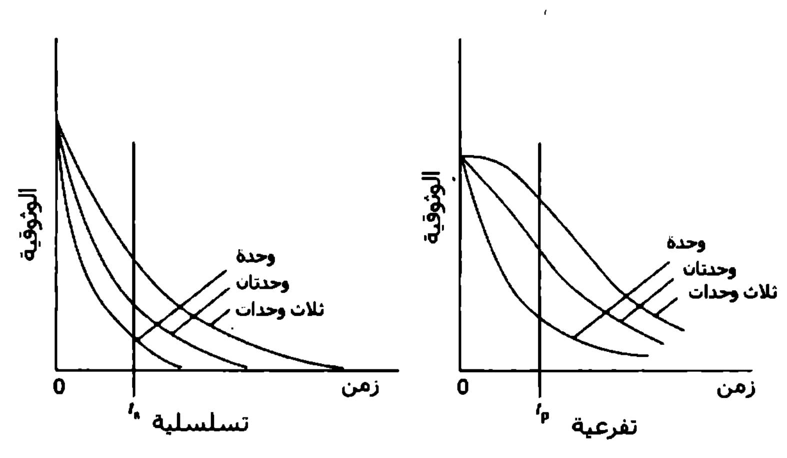
$$- \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$$

$$m_p = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} + \ldots + \frac{1}{n\lambda}$$

حيث تشير n الموجودة في المعادلات السابقة إلى عدد العناصر أو الوحدات الجزئية التي تملك نسب أعطال متساوية.

ويعطى عامل الاستخدام (الانتفاع) U بالنسبة لنظام وفق العلاقة:

$$U = \frac{\text{زمن التشغيل (العمل)}}{\text{زمن التشغيل + زمن الصيانة + زمن التعطيل}}$$



الشكل 5.49 منحنيات الوثوقية للأنظمة التسلسلية والتفرعية

يعطى عامل التوفر (وهو عامل الاستخدام الأعظمي) A بالعلاقة:

$$A = U_{max} = \frac{\text{زمن التشغيل (العمل)}}{\text{زمن التشغيل + زمن الصيانة الأعظمي}}$$

ومــن أجــل أي مجموعــتين من حالات العمل x و m نستطيع كتابة العلاقة بين الجهدين V_x و V_m والحرارة t_x و t_m ونسبتي العطل λ_x و λ_m على التوالي على الشكل التالي:

$$\lambda_x = \lambda_m \left(\frac{V_x}{V_m}\right)^n K^{t_x - t_m}$$

حــيث يُمثل n و K هنا ثابتين وفق مجال محدد من الشروط ويمكن تحديدهما كما يلي:

$$K = \frac{\lambda_x}{\lambda_m} \frac{1}{t_x - t_m}$$

وذلك من أجل اختبار بجهد ثابت، أما إذا كان الاختبار بدرجة حرارة ثابتة (مع ثبات درجة الحرارة) فإن:

$$n = \frac{\ln(\lambda_x / \lambda_m)}{\ln(V_m / V_x)}$$

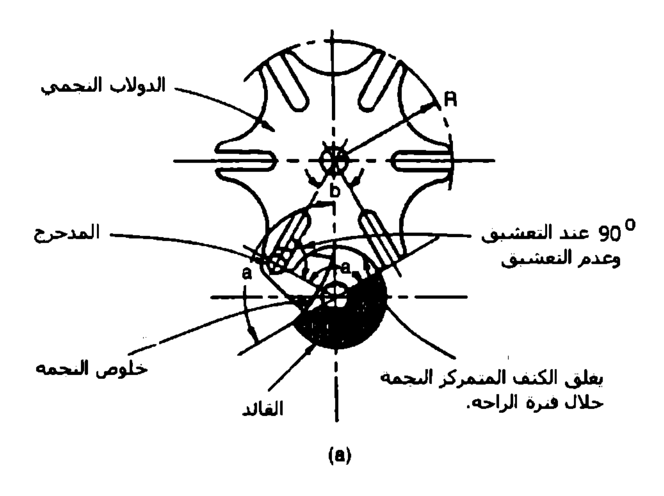
تصميم دولاب GENEVA

لقــد اســتخدم دولاب جنــيفا بالأصــل لإيقاف أو منع التدوير الزائد لنوابض الســاعات، وذلك عبر عدم شق أحد الشقوق وبالتالي سيكون عدد مرات تدوير المحــور محــدودة. أمــا الآن فيعتبر دولاب جنيفا واحداً من أكثر نواقل الحركة استخداماً في الحركات الدورانية المتقطعة ذات السرعات العالية.

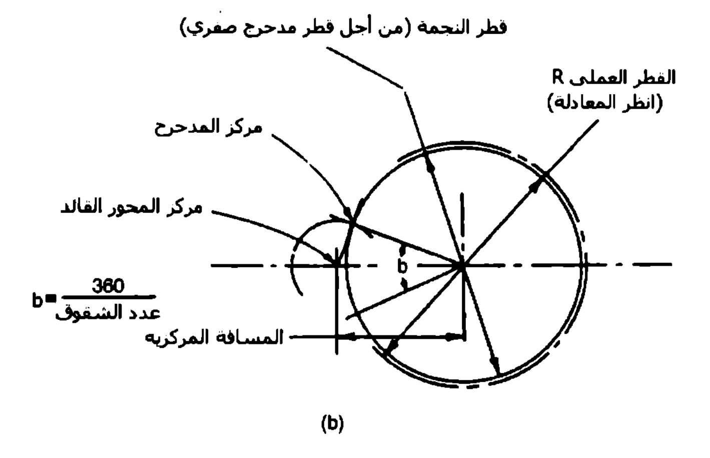
معادلات التصميم

نستطيع حساب التوضع الزاوي عند أي لحظة والسرعة والتسارع والقطر العملي للدولاب النجمي من المعادلات التالية.

ولكـــن ســـنعرض أولاً الشكل 5.51 الذي يوضح معنى الرموز التي ستستخدم في المعادلات.

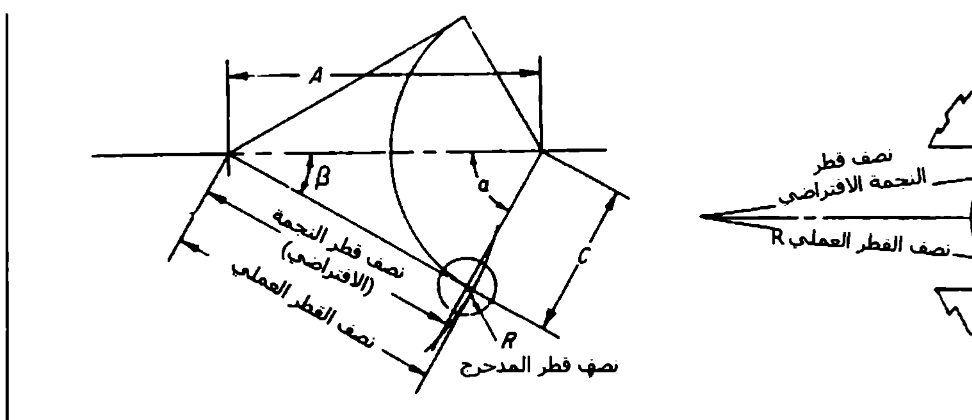


(a)



(b)

الشكل 5.50 مكونات دولاب GENEVA. a) آلية GENEVA الكاملة، b) مخطط يوضح الخطوة الأولية في التصميم.



الشكل 5.51 الرموز المستخدمة في معادلات دولاب Geneva.

المسافة المركزية:

$$A = C\,M$$

حيث

$$M = \frac{1}{\sin(180 / no.of\ slots)}$$

الإزاحة الزاوية:

$$\tan\beta = \frac{\sin\alpha}{M - \cos\alpha}$$

السرعة الزاوية:

$$= \frac{d\beta}{dt}$$

$$= \omega \frac{M\cos\alpha - 1}{1 + M^2 - 2M\cos\alpha}$$

التسارع الزاوي rad/s^2:

$$= \frac{d^2\beta}{dt^2}$$

$$= \omega^2 \frac{M\sin\alpha(1 - M^2)}{(1 + M^2 - 2M\cos\alpha)^2}$$

وسيكون التسارع أعظمياً عند تحقيق:

$$\cos\alpha = \pm\sqrt{\left(\frac{1 + M^2}{4M}\right)^2 + 2} - \frac{1 + M^2}{4M}$$

وســـيحدث التسارع الأعظمي وبالتالي التآكل الأعظمي عند حوالي ثلث أو ربع المسافة من طول الشق من جهة حرف الدولاب.

ويعطى القطر العملي للدولاب النجمي بالعلاقة:

$$2R = \sqrt{A^2 - C^2 + \mu^2}$$

معادلات الإجهاد للاسطوانات الرقيقة

عندما تكون نسبة نصف القطر الخارجي إلى نصف القطر الداخلي من 1.14 إلى 1، فعـــندها تصنف هذه الاسطوانة ضمن الاسطوانة الرقيقة. ستكون الإجهادات غير منـــتظمة الـــتوزيع على كامل نصف القطر وستكون أعظمية عند نصف القطر الداخلـــي، وتُحدَّد تغيرات الإجهاد بالتحليل الرياضي وتعطي قيماً قريبة جداً من الاختـــبارات الحقيقـــية. وهـــناك عدة معادلات تحسب قيم الإجهاد عند الجدار الداخلـــي عـــند شـــروط نهايات مختلفة ولمواد مختلفة، وتعرف كل معادلة باسم واضعيها. وسنقدم في الجدول التالي أربع معادلات لأربعة مؤلفين.

الافتراضات	المعادلة	المؤلف
للمواد القصفة ولنهايتين مغلقتين	$S_t = a + \frac{b}{r^2} = p\left(\frac{1+R^2}{R^2-1}\right) = p\left(\frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}\right)$	Lame
لنهايتين مفتوحتين	$S_t = \frac{PD}{2t} = p\left(\frac{r_o}{t}\right) = p\left(\frac{R}{R-1}\right)$	Barlow
للمواد المطيلية ولنهايتين مغلقتين	$S_t = (1-2m)a + \frac{1+m}{r_i^2}b$	Clavarino
	$= \frac{0.4}{R^2-1} + \frac{1.3R^2}{R^2-1} = p\left(\frac{0.4+1.3R^2}{R^2-1}\right)$	
للمواد المطيلية ولنهايتين مفتوحتين	$S_t = (1-m)a + (1+m)\frac{b}{r_i^2}$	Birnie
	$= p\left(\frac{0.7}{R^2-1} + \frac{1.3R^2}{R^2-1}\right) = p\left(\frac{0.7+1.3R^2}{R^2-1}\right)$	

المصطلحات

r_o = نصف القطر الخارجي، in

r_i = نصف القطر الداخلي، in.

D = القطر الخارجي، in.

S_t = الإجهاد العامل، الشد عند نصف القطر الداخلي، psi.

p = الضغط العامل، psi.

m = نسبة بواسون (0.3 للفولاذ).

t = سماكة الجدار $r_o - r_i$، in.

$$b = p\left(\frac{r_i^2 r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}\right) \qquad a = p\left(\frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}\right) \qquad R = \frac{r_o}{r_i}$$

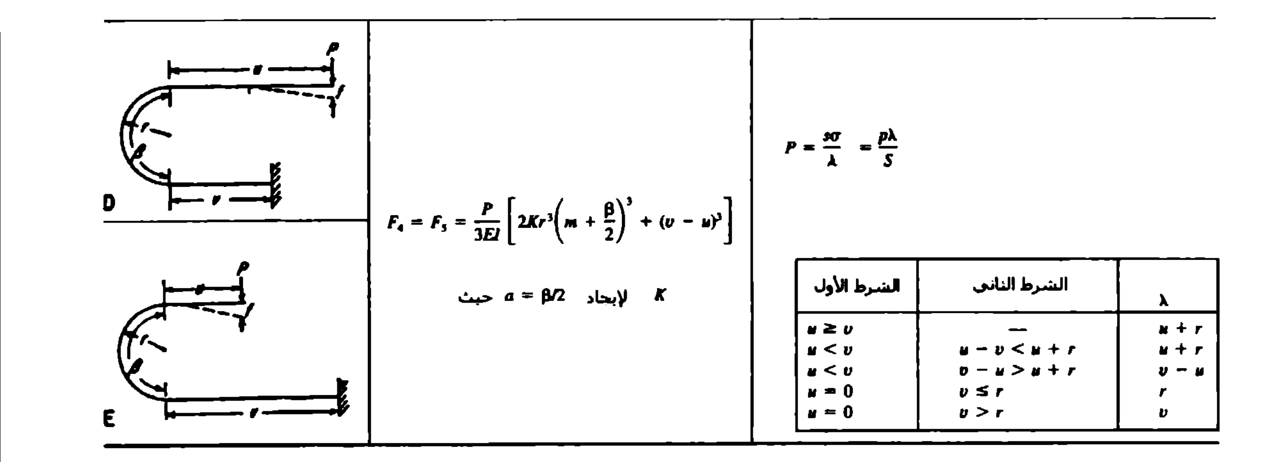
الجدول 5.20 : مقارنة بين المعادلات

المعادلات التصميمية للنوابض المنحنية

تصمم النوابض المنحنية عادةً بمعادلات تعتمد على الطول المفتوح للنابض مهملين تـــأثير الانحناء، وتعتبر هذه المعادلات غير دقيقة. تعتمد الطريقة الجديدة على نفس المفهـــوم ولكـــنها تصـــبح أدق عبر إضافة عامل تصحيح متعلق بالانحناء كما في الجدول التالي:

نوع النابض	انحراف النابض	قوة النابض واجهادات الانحناء
A	$F_1 = \frac{KPr^3}{3EI}(m + \beta)^3$ حيث $\alpha = \beta$ لإيجاد K	عندما $a = 0° \text{ to } 90°$ $P = \frac{s\sigma}{a + \sin\beta}$ $\sigma = \frac{Pr(m + \sin\beta)}{S}$ عندما $a = 90° \text{ to } 180°$ $P = \frac{S\sigma}{a + r}$ $\sigma = \frac{Pr(m + 1)}{S}$
B	$F_2 = \frac{2KPr^3}{3EI}\left(m + \frac{\beta}{2}\right)^3$ حيث $a = \beta/2$ لإيجاد K	$P = \frac{S\sigma}{L}$ $\sigma = \frac{Pl}{S}$
C	$F_3 = 2F_2 = \frac{4KPr^3}{3EI}\left(m + \frac{\beta}{2}\right)^3$ حيث $\alpha = \beta/2$ لإيجاد K	

الجدول 5.21 : معادلات النوابض المنحنية



$$P = \frac{s\sigma}{\lambda} = \frac{p\lambda}{S}$$

الشرط الأول	الشرط الثاني	λ
$u \geq v$	—	$u + r$
$u < v$	$u - v < u + r$	$u + r$
$u < v$	$v - u > u + r$	$v - u$
$u = 0$	$v \leq r$	r
$u = 0$	$v > r$	v

$$F_4 = F_5 = \frac{P}{3EI}\left[2Kr^3\left(m + \frac{\beta}{2}\right)^3 + (v - u)^3\right]$$

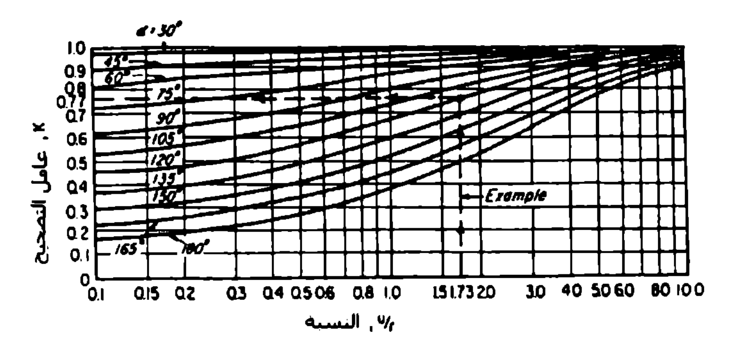
حيث $a = \beta/2$ لإيجاد K

الجدول 5.21 : /تابع/

المصطلحات

b = عرض النابض، D = قطر النابض، mm. E = عامل يونغ، Kg/mm^2. F = إزاحة النابض، mm. h = سماكة النابض، mm. I = عزم العطالة، mm^4. K = عامل تصحيح. L = ذراع العزم، mm. $m = \frac{u}{r}$ P = قوة النابض، Kg. r = نصف قطر الانحناء، mm. S = معيار المقطع، mm^2. u = طول المقطع المستقيم عند نهاية النابض الحرة، mm. v = طول المقطع المستقيم عند نهاية النابض الثابتة، mm. α = وسيط لرسم K، deg. β = زاوية انحناء النابض، rad. λ = ذراع العزم، mm. σ = إجهاد الانحناء الأعظمي، Kg/mm^2.

وللحصول على نتائج دقيقة يجب أن لا تتجاوز النسبة h/r للنوابض المستوية وD/r للنوابض ذات المقطع الدائري القيمة 0.6.



الشكل 5.52 : عامل تصحيح انحناء النابض

تتوافق النتائج التجريبية مع الانحرافات المحسوبة وفق هذه المعادلات. فمثلاً تم حساب انحراف النابض D وكان ضمن 8 % من الانحراف الحقيقي، بينما سيعطي حساب الإجهاد نسبة خطأ 100 % في حال إهمال الانحناء. وكما رأينا فقد تم تصنيف النوابض المنحنية وفق خمسة أنواع رئيسية، ويمكن حساب أنواع أعقد عبر تقسيم النابض وفق هذه الأنواع الرئيسية.

لقد قام بوضع هذه المعادلات وعوامل التصحيح كلٌ من JoachimPalm وThomas Klaus بمدينة ميونخ في ألمانيا.

المعادلات الهيدروديناميكية المفيدة أثناء تصميم المدحرجات (البيليات)

تتطلب عملية تصميم المدحرجات عدداً من المعادلات الهيدروديناميكية ترتبط بعلم الموائع وتدفق السوائل والقدرة والضغط والعزم ولزوجة السائل وكثافة السائل. ويقدم الجدول التالي بيانات مفيدة عن هذه المفاهيم وفق الجملتين SI وUSCS.

الاسم	الوحدة	الرمز	المعادلة أو القيمة	نظام الواحدات
الكتلة	وحده الكتلة البريطانية	M	$\frac{lb \times s^2}{ft}$	USCS
الكتلة بالكيلوغرام	وحدة الكتلة المترية	M	$\frac{kg \times s^2}{m}$	SI
الكتلة بالغرام	$\frac{dyn \times s^2}{cm}$	M	$\frac{dyn \times s^2}{cm}$	SI
ثابت الجاذبية الأرضية	$\frac{ft}{s^2}$	g	32.174 (في لندن)	USCS
	$\frac{m}{s^2}$	g	9.807 (في باريس)	SI
القوة	dyn	P	$\frac{1}{981} g$	SI
	Poundal	P	$\frac{1}{32.174}$	USCS
الضغط	ft	H	للماء 1 ft يساوي $0.433\ lb/in^2$ أو 62.335 lb	USCS
العمل المقتّر	hp	N	550 ft · lb/s or 33,000 ft · lb/min	USCS

الجدول 5.22 : المعادلات الهيدروديناميكية المفيدة في عملية تصميم المدحرجات

الجدول 5.22 : المعادلات الهيدروديناميكية المفيدة في عملية تصميم المدحرجات /تابع/

الاسم	الوحدة	الرمز	المعادلة أو القيمة	نظام الواحدات
العمل المفقد	hp	N	$\frac{ft^3}{s} \times \frac{head \times sp\ gr}{8.8}$ or $\frac{gal}{min} \times \frac{head \times sp\ gr}{3960}$	USCS
	hp	N	$\frac{ft^3}{min} \times \frac{lb}{ft^2} \times \frac{1}{33{,}000}$ or $\frac{gal}{min} \times \frac{lb}{in^2} \times \frac{1}{1714}$	USCS
العزم	lb · ft	T	$\frac{hp \times 33{,}000}{rpm \times 2\pi} = \frac{5250\ hp}{rpm}$	USCS
الكثافة	الكتلة / واحدة الحجم	ρ	$\frac{lb}{ft^3} \times \frac{s^2}{ft} = \frac{slugs}{ft^3}$	SI
	الكتلة / واحدة الحجم	ρ	$\frac{g}{cm^3} \times \frac{s^2}{cm}$	
اللزوجة المطلقة بواحدات الجملة USCS	الكتلة / (الزمن × الطول)	μ	$\frac{slugs}{ft \cdot s} = \frac{lb \cdot s}{ft^2}$ 1 unit of $\frac{slugs}{ft \cdot s} = 178.69\ P$	USCS
		μ_A	$\frac{lb \cdot min}{in^2} = 4{,}136{,}000\ P$ $\frac{poundal \cdot s}{ft^2} = 14.88\ P$	

الاسم	الوحدة	الرمز	المعادلة أو القيمة	نظام الواحدات
اللزوجة المطلقة بواحدات الجملة الدولية SI	P		$\frac{1\ dyn \cdot s}{cm^2}$	SI
	cP	Z	$\frac{1}{100}$ P	
	$\frac{g \cdot s}{cm^2}$		981 P	
اللزوجة الحركية	$\frac{\text{مساحة}}{\text{زمن}}$	ν	$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\text{اللزوجة المطلقة}}{\text{الكثافة}}$	USCS and SI
	St, $\frac{cm^2}{s}$		$\frac{1\ P}{density}$	SI
	cSt		$\frac{1}{100}$ St	
	ثواني Saybolt العالمية	V	للتحويل من الجملة SUS إلى السنتيستوكس When SUS $\leqq$ 100 cSt = 0.226 SUS. − 195/SUS. When SUS. = 100 cSt = 0.220 SUS. − 135 /SUS.	SI
لزوجة نوعية	لا بعدي		نسبة اللزوجة المطلقة لأي سائل إلى لزوجة الماء عند الدرجة 20°C	قيمة مطلقة
لزوجة الماء عند الدرجة 20°C	cP	Z	Z = 1 cP	SI

الجدول 5.22 : المعادلات الهيدروديناميكية المفيدة في عملية تصميم المدحرجات /تابع/

الاسم	الوحدة	الرمز	المعادلة أو القيمة	نظام الواحدات
السيولة	$\frac{\text{زمن} \times \text{طول}}{\text{كتلة}}$	ϕ	$\phi = \frac{1}{\mu}$ وهي مقلوب اللزوجة المطلقة	SI و USCS
رقم رينولدز	لا بعدي	N_R	$N_R = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu}$ $v =$ سرعة المائع $\rho =$ الكثافة $d =$ قطر الأنبوب $\mu =$ اللزوجة المطلقة $\nu =$ اللزوجة الحركية	قيمة مطلقة
أرقام رينولدز الحرجة للجريان داخل الأنبوب	لا بعدي	N_c	$N_c = 2320 =$ رقم رينولدز الحدي الذي يفصل بين الجريان الصفحي والمضطرب For $N_R > 2320$, جريان مضطرب For $N_R < 2320$ جريان From $N_R = 1920$ to 4000, جريان غير مستقر	قيمة مطلقة
معادلة فقدان الطاقة بالاحتكاك للجريان داخل انبوب	ft or m	H_f	$H_f = f \times \frac{l}{d} \times \frac{v^2}{2g}$ $v =$ السرعة , ft/s or m/s $d =$ قطر الانبوب , ft or m $l =$ طول الانبوب , ft or m $g =$ ثابت الجاذبية الأرضية , ft/s^2 or m/s^2 $f =$ معامل التدفق	SI و USCS
معامل التدفق للجريان الصفحي	لا بعدي	f	$f = \frac{64}{N_R}$ مع إهمال خشونة الأنبوب	قيمة مطلقة

الجدول 5.22 : المعادلات الهيدروديناميكية المفيدة في عملية تصميم المدحرجات /تابع/

الاسم	الوحدة	الرمز	المعادلة أو القيمة	نظام الواحدات
معامل التدفق لأنبوب حديد صب نظيف ومقطع دائري	لا بعدي	f	$f = \frac{0.214}{\sqrt[4]{N_R}}$ جريان مضطرب $f = \frac{64}{N_R}$ جريان صفحي	قيمة مطلقة
معامل التدفق لأنبوب ناعم جداً ومقطع دائري	لا بعدي	f	$f = \frac{0.316}{\sqrt[4]{N_R}}$ جريان مضطرب $f = \frac{64}{N_R}$ جريان صفحي	قيمة مطلقة
معامل التدفق لأعلى درجات الخشونة	لا بعدي	f	$f = \frac{0.316}{\sqrt[4]{N_R}}$ $= 0.054$ جريان مضطرب $f = \frac{64}{N_R}$ جريان صفحي	قيمة مطلقة
رقم رينولدز للماء عند درجة حرارة 20^0 C	لا بعدي	N_R	$N_R = 100vd$ $v =$ السرعة , cm/s $d =$ قطر الأنبوب , cm	قيمة مطلقة
ثابت المدحرج (متغير Sommerfeld)	لا بعدي	S	$S = \left(\frac{D}{c}\right)^2 \frac{\mu n}{p}$ $D =$ قطر المدحرج $c =$ خلوص المدحرج $=$ قطر المدحرج - قطر المحور $\mu =$ اللزوجة المطلقة $p =$ واحدة الضغط $n =$ عدد دورات خلال واحدة الزمن	قيمة مطلقة

الجدول 5.22 : المعادلات الهيدروديناميكية المفيدة في عملية تصميم المدحرجات /تابع/

الجدول 5.22 : المعادلات الهيدروديناميكية المفيدة في عملية تصميم المدحرجات /تابع/

نظام الواحدات	المعادلة أو القيمة	الرمز	الوحدة	الاسم
قيمه مطلقة	$S = 1,000,000 \times \frac{\mu n}{p}$ $= \frac{1,000,000Zn}{4,136,000 \times 100 \times p}$ $\mu_4 =$ اللزوجة المطلقة , $lb \cdot min/in^2$ $n = rpm$ $p = lb/in^2$ $Z =$ اللزوجة المطلقة , cSt For $\frac{Zn}{p} = 36$, $S = 0.00242 \times 36 = 0.087$ ملاحظة: يظهر مخطط Burwell's الضغط الأعظمي المسموح به عند $s = 0.267$ ولكن مع ضغط عالي بشكل معقول ومعامل احتكاك أصغري عند المجال: $S = 0.080$ to $S = 0.50$ (See ASME *Transactions* 1942, p. 457.)	S	لا بعدي	مثال: أوجد متغير Sommerfeld من أجل D/C = 1000
قيمة مطلقة	$S_t = \frac{Zn}{p}$ $Z =$ اللزوجة المطلقة , cP $n = rpm$ $p =$ اللزوجة الملطقة , lb/in^2	S_t	لا بعدي	ثابت المدحرج

المدحرجات (البيليات)

تعطى علاقة العمر النسبي مقدرةً بملايين الدورات بالعلاقة:

$$L_n = \frac{60NL_h}{1000000}$$

حيث

N = سرعة الدوران دورة/دقيقة.

L_h = عدد ساعات العمل.

كما وتعطى العمر النسبي أيضاً بالعلاقة:

$L_n = \left(\frac{C}{P}\right)^3$ للمدحرجات ذات الكرات.

$L_n = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}}$ للمدحرجات ذات الاسطوانات الدائرية.

الآن وبعد أن نحصل على الحمل المكافئ P نستطيع من هذه العلاقة إيجاد السعة C وهي التي سنستخدمها في عملية اختيار المدحرج المناسب، وتسمى النسبة $\frac{C}{P}$ بنسبة التحميل.

ويعطى الحمل الستاتيكي المكافئ بالعلاقة:

$$P_o = X_o F_r + Y_o F_a$$

حيث

F_a = الحمل المحوري (القوة باتجاه المحور).

F_r = الحمل القطري (القوة باتجاه نصف القطر).

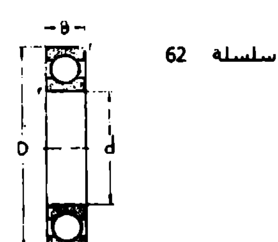
X_o, Y_o = عوامل تتعلق بنوع المدحرج وعدد صفوف الكرات في المدحرج (يؤخذ من المراجع الهندسية) وقيمتها من أجل المدحرجات الكروية ذات الأخدود العميق (Deep Groove Ball Bearings) $X_o = 0.6$ و $Y_o = 0.5$

وهـــناك عوامل أخرى تدخل في حساب السعة مثل عوامل العمر وعوامل تتعلق بنوع المدحرج وعامل يأخذ سرعة الدوران الكبيرة بعين الاعتبار، ولن نتعرض هنا لكيفية اختيار هذه العوامل إذ أنها موجودة في المراجع الهندسية إنما سننتقل إلى سرد أنواع المدحرجات:

سلسلة 62

المدحرجات ذات الكرات والاخدود العميق

Deep Groove Ball Deatings



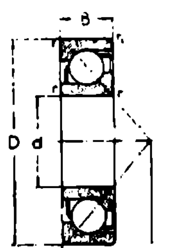
	الرقم التصميمي وفق شركة (SKF)	d	D	B	r	السعة الأساسية N ستاتيكية	دينامكية	السرعة العظمى المسموح بها
		mm	mm	mm	mm	C_o	C	rev/min
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
10BC02	6200	10	30	9	1	2160	3925	20000
12BC02	01	12	32	10	1	2940	5250	20000
15BC02	02	15	35	11	1	3430	5980	16000
17BC02	6203	17	40	12	1	4315	7355	16000
20BC02	04	20	47	14	1.5	6375	9805	16000
25BC02	05	25	52	15	1.5	6965	10690	13000
30BC02	6206	30	62	16	1.5	9805	14710	13000
35BC02	07	35	72	17	2	13535	19615	10000
40BC02	08	40	80	18	2	15495	22165	10000
45BC02	6209	45	85	19	2	17750	24910	8000
50BC02	10	50	90	20	2	20595	27070	8000
55BC02	11	55	100	21	2.5	25300	33340	8000
60BC02	6212	60	110	22	2.5	31580	40210	6000
65BC02	13	65	120	23	2.5	35715	42905	6000
70BC02	14	70	125	24	2.5	38440	47070	5000
75BC02	6215	75	130	25	2.5	41385	50600	5000
60BC02	16	80	140	26	3	44130	55505	5000
85BC02	17	85	150	28	3	53450	63745	4000

السلسلة 22
والسلسلة 23

المدحرجات الكروية ذات التوضع الذاتي

Self-Aligning Ball Deanings

	الرقم التصميمي وفق شركة (SKF)	d	D	B	r	السعة الأساسية N ستاتيكية	ديناميكية	السرعة العظمى المسموح بها
		mm	mm	mm	mm	C_0	C	rev/min
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
2200		10	30	14	1	1670	5540	20000
01		12	32	14	1	1960	5640	20000
02		15	35	14	1	2110	5740	16000
2203		17	40	16	1	2745	7500	16000
04	2204 K	20	47	18	1.5	3825	9610	16000
05	05 K	25	52	18	1.5	4120	9610	13000
2206	2206 K	30	62	20	1.5	5390	11770	13000
07	07 K	35	72	23	2	7845	16180	10000
08	08 K	40	80	23	2	8825	16920	10000
2209	2209 K	45	85	23	2	9810	17410	8000
10	10 K	50	90	23	2	10490	17410	8000
11	11 K	55	100	25	2.5	12455	20200	8000
2212	2212 K	60	110	28	2.5	15300	25810	6000
13	13 K	65	120	31	2.5	19610	33340	6000
14	—	70	125	31	2.5	21080	34080	5000
2215	2215 K	75	130	31	2.5	21575	34080	5000
16	16 K	80	140	33	3	24520	37850	5000
17	17 K	85	150	36	3	29030	44620	4000

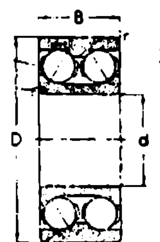


سلسلة 72B

المدحرجات ذات الكرات بتماس زاوي وصف واحد

Single Row Angular Contact Ball Bearings

	الرقم التصميمي وفق شركة (SKF)	d mm	D mm	B mm	r mm			السعة الأساسية N ستاتيكية C_o	ديناميكية C	السرعة العظمى المسموح بها rev/min
	(1)	(2)	(3)		(4)	(5)		(6)	(7)	(8)
15BA02	7202 B	15	35	11	1	05	16	3680	6080	13000
17BA02	03 B	17	40	12	1	0.8	18	4460	7700	13000
20BA02	04 B	20	47	14	1.5	0.8	21	6370	10150	10000
25BA02	7205 B	25	52	15	1.5	0.8	24	7700	11280	10000
30BA02	06 B	30	62	16	1.5	08.	27	10790	15400	10000
35BA02	07 B	35	72	17	2	1	31	14710	20590	8000
40BA02	7208 B	40	80	18	2	1	34	18490	24520	8000
45BA02	09 B	45	85	19	2	1	37	21180	27655	6000
50BA02	10 B	50	90	20	2	1	39	23140	28440	6000
55BA02	7211 B	55	100	21	2.5	1.2	43	29175	36285	6000
60BA02	12 B	60	110	22	2.5	1.2	47	36285	42900	5000
65BA02	13 B	65	120	23	2.5	1.2	50	42410	49030	5000
70BA02	7214 B	70	125	24	2.5	1.2	53	44620	52470	5000
75BA02	15 B	75	130	25	2.5	1.2	56	49030	54430	4000
80BA02	16 B	80	140	26	3	1.5	59	55650	60800	4000
85BA02	7217 B	85	150	28	3	1.5	64	63740	69630	4000
90BA02	18 B	90	160	30	3	1.5	67	75760	81400	4000
95BA02	19 B	95	170	32	3.5	2	71	85810	92670	3000
100BA02	7220 B	100	180	34	3.5	2	76	90710	98070	3000
105BA02	21 B	105	190	36	3.5	2	80	101500	106890	2500
110BA02	22 B	110	220	38	3.5	2	84	112780	117680	2500



سلسله 33A

المدحرجات ذات الكرات بتماس زاوي وصفين

Bouble Row Angular Contact Ball Bearings

الرقم التصميمي وفق شركة (SKF)	d mm	D mm	B mm	r mm	السعة الأساسية N سناتيكية C_o	دينامبكيه C	السرعة العظمى المسموح بها rev/min
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
3302 A	15	42	19.0	1.5	9070	13730	10000
03 A	17	47	22.2	1.5	12650	18930	8000
04 A	20	52	22.2	2	13730	18930	8000
3305 A	25	62	25.4	2	19615	26085	6000
06 A	30	72	30.2	2	27165	35300	6000
07 A	35	80	34.9	2.5	35600	43640	5000
3308 A	40	90	36.5	2.5	44620	53450	5000
09 A	45	110	39.7	2.5	54430	62270	4000
10 A	50	110	44.4	3	72570	80170	4000
3311 A	55	120	49.2	3	78450	85910	4000
12 A	60	130	54.0	3.5	94630	98070	3000
13 A	65	140	58.7	3.5	108950	115720	3000
3314 A	70	150	63.5	3.5	126510	135820	3000
15 A	75	160	68.3	3.5	138080	140235	2500
16 A	80	170	86.3	3.5	153965	157890	2500
3317 A	85	180	73.0	4	173580	173580	2500
18 A	90	190	73.0	4	205940	200150	2500

Cylindrial Roller Beanings المدجرجات ذات الأسطوانات

الرقم التصميمي وفق شركة (SKF)	d mm	D mm	B mm	T mm	C mm	r mm	r_1 mm	a mm	السعة الأساسية N، ستاتيكية C_o	السعة الأساسية N، ديناميكية C	السرعة العظمى المسموح بها rev/min
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
سلسلة NU 22 — NU 2205		25	52	18	1.5	1	32		11030	15790	13000
2206		30	62	20	1.5	1	38.5		16970	23140	13000
2207		35	72	23	2	1	43.8		27655	35600	10000
NU 2208		40	80	23	2	2	50		32750	40700	10000
2209		45	85	23	2	2	55		35600	43640	8000
2210		50	90	23	2	2	60.4		38540	45500	8000
NU 2211		55	100	25	2.5	2	66.5		45500	52560	8000
2212		60	110	28	2.5	2.5	73.5		59820	69630	6000
2213		65	120	31	2.5	2.5	79.6		74040	81640	6000
NU 2214		70	125	31	2.5	2.5	84.5		78450	85910	5000
2215		75	130	31	2.5	2.5	88.5		84730	96350	5000
2216		80	140	33	3	3	95.3		98070	109340	5000
NU 2217		85	150	36	3	3	101.8		117680	127000	4000
2218		90	160	40	3	3	107		135820	140235	4000
2219		95	170	43	3.5	3.5	113.5		160340	173580	4000
NU 2220		100	180	46	3.5	3.5	120		184855	196130	3000
2222		110	200	53	3.5	3.5	132.5		226435	254170	3000
2224		120	215	58	3.5	3.5	143.5		271645	280470	3000
NU 2226		130	230	64	4	4	156		306700	296650	2500
2228		140	250	68	4	4	169		378540	362850	2500
2230		150	270	73	4	4	182		436400	423650	2500

Taper Roller Bearings المدحرجات ذات الأسطوانات المتناقصة

	الرقم التصميمي وفق شركة (SKF)	d	D	B	T	C	r	r_1	a	السعة الأساسية N ، ستاتيكية C_0	ديناميكية C	السرعة العظمى المسموح بها rev/min
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
سلسلة 322	32206	30	62	20	21.25	17	1.5	0.5	15	27165	31675	6000
	07	35	72	23	24.25	19	2	0.8	18	36285	41430	6000
	08	40	80	23	24.75	19	2	0.8	19	40210	45500	6000
	32209	45	85	23	24.75	19	2	0.8	20	45500	49915	5000
	10	50	90	23	24.75	19	2	0.8	21	47270	51580	5000
	11	55	100	25	26.75	21	2.5	0.8	22	61050	65115	4000
	32212	60	110	28	29.75	24	2.5	0.8	24	75710	78450	4000
	13	65	120	31	32.75	27	2.5	0.8	26	90810	96105	4000
	14	70	125	31	33.25	27	2.5	0.8	28	90810	96105	3000
	32215	75	130	31	33.25	27	2.5	0.8	29	99930	101450	3000
	16	80	140	33	35.25	28	3	1	30	113760	117680	3000
	17	85	150	36	38.5	30	3	1	33	134840	135820	2500
	32218	90	160	40	42.5	34	3	1	36	160730	158080	2500
	19	95	170	43	45.5	37	3.5	1.2	38	180440	180440	2500
	20	100	180	46	49	39	3.5	1.2	41	207705	202510	2500
	32221	105	190	50	53	43	3.5	1.2	44	241240	236340	2000
	22	110	200	53	56	46	3.5	1.2	46	271645	254000	2000
	24	120	213	53	61.5	50	3.5	1.2	52	334410	298120	2000
	32226	130	230	64	67.75	54	4	1.5	56	407960	369710	1600
	28	140	250	68	71.75	58	4	1.5	60	481510	422670	1600
	30	150	270	73	77	60	4	1.5	64	534460	480525	1600

الدولاب المعدّل

تعطى الطاقة الحركية ضمن حلقة الدولاب المعدّل:

$$E_k = \frac{W v^2}{2g}$$

حيث

W : وزن الحلقة N (Kg).

g = 9.81 m/s^2.

$v = \pi D n$ = السرعة الخطية عند النقطة الموافقة لنصف القطر الوسطي للحلقة.

n = عدد الدورات الوسطي rev/s.

ويعطى التغير في الطاقة بالعلاقة:

$$E = C_E \frac{1000 P}{n}$$

E = التغير في الطاقة، J.

P = الاستطاعة، KW.

n = عدد الدورات الوسطي، rev/s.

C_E = معدّل التقلب في الطاقة، ويعطى وفق الجدول التالي:

معدّل التقلب في الطاقة لمحركات الاحتراق الداخلي C_E*

نوع المحرك	عدد الاسطوانات	الزاوية بين أجزاء العمود المرفقي	التقلب بالطاقة بـ %	
			رباعي الشوط	ثنائي الشوط
Single	1	-	2.35 - 2.40	0.95 - 1.00
Acting	2	180°	1.50 - 1.60	0.20 - 0.25
شاقولي	3	120°	0.60 - 0.75	0.15 - 0.18
شاقولي	4	180° and 90°	0.15 - 0.20	0.075 - 0.10
شاقولي	6	180° and 60°	0.10 - 0.12	0.016 - 0.02

* توخذ الحدود الدنيا في حالة المحركات العاملة تحت ضغط منخفض، بينما توخذ الحدود العليا للمحركات العاملية تحت ضغط عالي

وكمـــا نعلم تتركز كتلة الدولاب المعدّل في الحلقة الخارجية، ويعطى وزنها كما يلي:

$$W = \frac{9}{10}W = \left(\frac{2\pi}{10^6}\right)k.A.\omega$$

ω = الوزن النوعي للمعدن وتساوي

لحديد الصب $\omega = 69600\ N/m^3\ (7100\ Kg/m^3)$

للفولاذ $\omega = 76500\ N/m^3\ (7800\ Kg/m^3)$

k = نصف القطر القطبي للحلقة، m.

A = مساحة مقطع الحلقة، mm^2.

حيث يعطى عرض الحلقة $B = b + (25 \text{ to } 50)\ mm$ لدولاب معدّل عند استخدامه كبكرة لسير.

حيث

b = عرض السير.

وتعطى سماكة الحلقة كقيمة مقترحة كما يلي:

$$- t/B = 0.5 - 1.25$$

ويعطى قطر البطيخة بالعلاقة:

$$d_h = 2\ d_s$$

وطول البطيخة يقدر بالعلاقة:

$$L = 2\ d_s \quad \text{to} \quad 2.5\ d_s$$

ويمكن إيجاد قوة الطرد المركزية على نصف الحلقة، N (Kgf):

$$F_c = \frac{2}{10^6}\frac{Bt\,\omega.v^2}{g}$$

ويعطـــى إجهاد الشد عند مقطع الحلقة المكون لقوة الطرد المركزية مع عدم أخذ وجود عوارض بعين الاعتبار.

$$\sigma_t = \frac{\omega v^2}{10^6 g}[MN/m^2]$$

ويعطى إجهاد الانحناء عند أخذ العوارض بين البطيخة والحلقة بعين الاعتبار:

$$\sigma_b = \frac{\omega v^2}{10^6 g}\times\frac{2000\pi^2 R}{t\,i^2}$$

i = عدد الأذرع.

R = نصف القطر الوسطي m.

ويعطى إجهاد الشد المحصّل بالعلاقة:

$$\sigma_R = 0.75\, \sigma_t + 0.25\, \sigma_b$$

وتعطى القوة اللازمة لإيقاف الدولاب المعدّل بالعلاقة:

$$F_r = \frac{W_r . a}{g}$$

E_r = القوة اللازمة للإيقاف، [N].

W_r = وزن الحلقة، N (Kg f).

a = التباطؤ، m/s^2.

6

معادلات تشغيل المعادن

سرعة القطع

تعتبر سرعة القطع أهم حسابات أدوات القطع، وتعطى سرعة القطع عندما تعطى سرعة الدوران بالدورة في الدقيقة (rpm) وبعد معرفة القطر بالعلاقة:

$$CS = \frac{(D\pi)(rpm)}{12}$$

حيث

CS = سرعة القطع، ft/min (m/min).

D = القطر، in (mm).

π = 3.1416

rpm = سرعة الدوران، rpm.

ونستطيع استخدام علاقة أبسط وتطبيقها في الحالات العملية وتعطي أجوبة معقولة وهي:

$$CS = \frac{(D)(rpm)}{4}$$

ولإيجاد سرعة الدوران مع معرفة سرعة القطع والقطر نستخدم العلاقة:

$$rpm = \frac{4CS}{D}$$

سرعة تغذية أداة القطع

تعطى سرعة تقدم أداة الخراطة، الثقب، أداة حفر، موسّع ثقوب، ... الخ. وبعد معرفة طول القطع والزمن المستغرق لعملية القطع وسرعة الدوران بالعلاقة:

$$F = \frac{L}{(rpm)(T)}$$

حيث

F = التغذية، in/rev (mm/rev).

L = طول القطع، in (mm).

T = الزمن، min.

المحاور المخروطية

تستخدم العلاقة التالية لحساب طول المحور المخروطي أو مقدار الانخفاض في القطر لواحدة الطول من المحور:

$$L = \frac{12(D_1 - D_2)}{T}$$

حيث

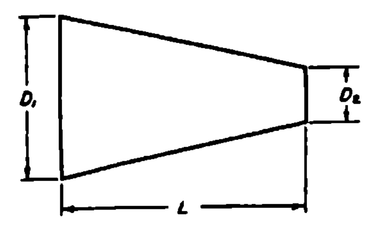
L = طول المخروط.

D_1 = القطر الكبير.

D_2 = القطر الصغير.

T = مقدار الانخفاض في القطر لواحدة الطول foot (m).

ويظهر الشكل التالي أبعاد المحور المخروطي:



الشكل 6.1

آلات التفريز

يجب أن يتوافق مقدار تغذية أو تقدم الطاولة في آلات التفريز مع سرعة دوران أداة القطع (rpm) ومقدار التقدم لكل سن لكل دورة من دورات أداة القطع.

تغذية الطاولة = (التقدم لكل سن) (عدد الأسنان) (سرعة الدوران rpm).

ولمعرفة مقدار الانتقال الكلي لطاولة التفريز لإجراء عمليات التفريز من الضروري معرفة طول الاقتراب أو الاقتحام.

ويعطى طول الاقتراب من سطح القطع بالعلاقة:

$$approach = \frac{D - \sqrt{D^2 - F^2}}{2}$$ الاقتراب أو الاقتحام

حيث

approach = مقدار الاقتراب أو الاقتحام، in (mm).

D = قطر أداة القطع.

F = وجه القطع.

ويعطى مقدار التغذية لكل سن من أسنان سكينة التفريز بالعلاقة:

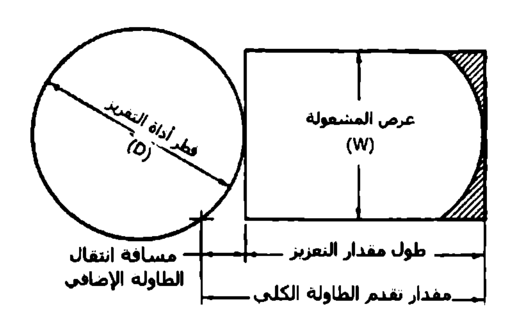
$$\text{التغذية لكل سن} = \frac{\text{مقدار تغذية الطاولة}}{\text{(rpm) (عدد الأسنان)}}$$

يجب أن نعطي زمناً للآلة إضافيا لتفريز الوجه. وعند انتقال سكينة التفريز على طول الوجه فإنه سيبقى جزء من الوجه المراد تفريزه غير مفرّز، وهذا ما عبرنا عنه بالمساحة المهشرة من الشكل 6.2، ولإكمال تفريز كامل الوجه يجب أن نزيد مسافة الانتقال لطاولة التفريز. ويجب حساب هذه المسافة المضافة وإعطاء زمن مناسب لإنجاز هذه المسافة الزائدة، وتحسب هذه المسافة بالمعادلة:

مسافة انتقال الطاولة الإضافية = $1/2(D-\sqrt{D^2-W^2})$

هناك ثلاث معادلات تستخدم في حسابات آلات التفريز وهاك أولاها:

$$CS = \frac{(D)(rpm)}{4}$$



الشكل 6.2: مقدار اقتراب أداة القطع

حيث

CS = سرعة القطع، ft/min (m/min).

rpm = سرعة الدوران، rpm.

D = قطر أداة القطع، in (mm).

والمعادلة الثانية هي:

$$rpm = \frac{4CS}{D}$$

بينما المعادلة الثالثة تعطى بالعلاقة:

$$\text{الزمن} = \frac{\text{طول القطع}}{(rpm)\ (\text{عدد الأسنان})\ (\text{التغذية لكل سن})}$$

مقدار تقدم سكينة التفريز

تتجاوز حركة طاولة التفريز في معظم عمليات التفريز طول المنطقة المراد تفريزها الموضحة على الرسمة الجزئية للقطعة، ويبين الشكل 6.3 مقدار تقدم سكينة التفريز ويعطى وفق المعادلة:

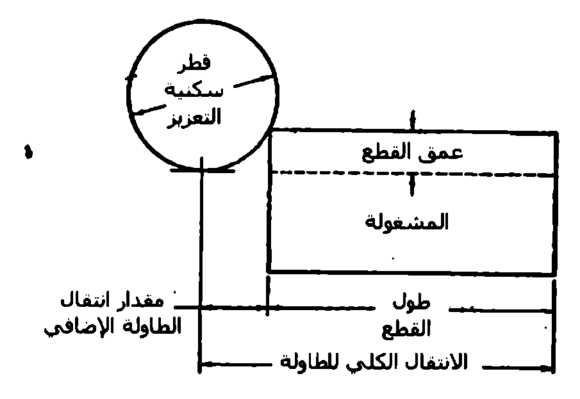
$$\text{التقدم} = \sqrt{Dd - d^2}$$

حيث

D – قطر سكينة التفريز، in (mm).

d – عمق القطع، in (mm).

تعتبر هذه المعادلة صحيحة فقط إذا كان عمق القطع أقل من نصف قطر سكينة التفريز، وعندما يكون عمق القطع مساوياً أو أكبر من نصف قطر سكينة التفريز فإن التقدم سيكون دوماً مساوياً لنصف قطر سكينة التفريز.



الشكل 6.3: تقدم سكينة التفريز

عمق التفريز المطلوب لمكان توضع الخابور

يعطى عمق التفريز المطلوب لتهيئة مكان الخابور بالعلاقة:

$$D = \frac{T}{2} + A$$

$$A = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2}$$

حيث

D = عمق القطع، in (mm).

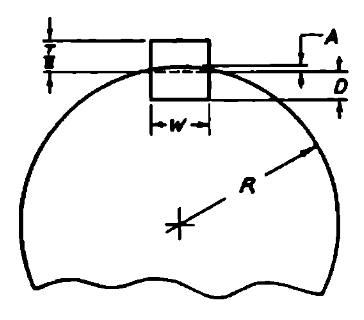
T = سماكة الخابور.

W = عرض الخابور.

A = ارتفاع القوس المحدد بعرض الخابور.

R = نصف قطر المحور.

وفيما يلي شكل يبين هذه الأبعاد:



الشكل 6.4: أبعاد الخابور ومكان توضع الخابور

زمن الإنتاج (التشغيل)

تعطى معادلة حساب الزمن الحقيقي لإنتاج قطعة واحدة من أجل مجموعة تحوي بحجوم قطعاً مختلفة بالعلاقة:

$$T = \frac{SU}{N} + U$$

حيث

T – الزمن الحقيقي لإنتاج الوحدة، min.

SU – زمن التحضير، min.

N – عدد القطع في المجموعة.

U – الزمن القياسي للوحدة، min.

طريقة الإنتاج المثلى

عندما تتوفر أكثر من طريقة لإنتاج جزء مكون من قطعة أو عدة قطع، فإنه يمكن إيجاد عدد القطع من ذلك الجزء والناتج عن تغيير طريقة الإنتاج بالعلاقة:

$$N = \frac{SU_2 - SU_1}{T_1 - T_2}$$

حيث

N – عدد القطع التي نستطيع ربحها باعتماد طريقة معينة.

SU_1 – زمن تحضير الطريقة الأولى.

SU_2 – زمن تحضير الطريقة الثانية.

T_1 = زمن إنتاج الوحدة بالطريقة الأولى.

T_2 = زمن إنتاج الوحدة بالطريقة الثانية.

حجم المجموعة الأصغري

تعتمد معادلة تحديد حجم المجموعة الأصغري على زمن التحضير وعلى الزمن القياسي لإنتاج وحدة كما يلي:

$$N = \frac{SU}{TK}$$

حيث

N = حجم المجموعة الأصغري.

SU = زمن التحضير.

T = الزمن القياسي لإنتاج وحدة.

K = نسبة عظمى تختار بشكل كيفي.

زمن الخراطة

يتأثر زمن الخراطة من قطر لآخر بعدة عوامل، حيث يتأثر الزمن بكلٍّ من قطر المشغولة ونوع المادة وسرعة محور الدوران وسرعة التغذية وعمق القطع. وإذا كانت سرعة محور الدوران (أو سرعة القطع) بنصف ما هو مفروض فإن زمن تشغيل القطعة سيتضاعف مرتين، وكذلك الأمر بالنسبة لمقدار التغذية، فإذا كان كل من التغذية والسرعة كلاهما بنصف ما هو مفروض فإن الزمن اللازم سيستغرق أربعة أضعاف:

$$\text{الزمن} = \frac{\text{طول القطع}}{\text{(التغذية) (سرعة الدوران rmp)}}$$

الزمن المطلوب لتبديل أدوات القطع

تعطى معادلة الزمن اللازم لتبديل أدوات القطع بالعلاقة:

$$UT = \frac{(TT)(CT)}{L}$$

حيث

UT = الزمن القياسي لتبديل الأداة المثلمة بالأداة الحادة.

TT = الزمن الكلي لتبديل الأدوات.

CT = زمن القطع الذي تؤديه الأداة أثناء عملية التشغيل.

L = عمر الأداة.

زمن إجراء الشدف (الشنفرة)

تعطى المعادلة التي تحسب الزمن المستغرق في عملية الشنفرة بالشكل:

$$\text{زمن الشنفرة} = \frac{\text{طول القطع}}{\text{(التغذية) (سرعة الدوران rpm)}}$$

زمن خراطة الوجه

يعطى الزمن اللازم لخراطة وجه المشغولة على المخرطة بالعلاقة:

$$\text{زمن خراطة الوجه} = \frac{\text{طول القطع}}{(\text{التغذية})\ (\text{سرعة الدوران rpm})}$$

أبعاد اللولب المطلوبة عند تشغيل اللولب

يعتبر عمق السن عنصراً هاماً ومؤثراً على عملية تقدير الزمن اللازم لتشغيل القلاووظ، وعلى الاستطاعة المنقولة (KW)، وعلى نسبة الإنتاج وعلى متغيرات هامة أخرى. ويحسب عمق السن لأنواع البراغي المختلفة بالعلاقات التالية:

1. سن V وفق أمريكي نظامي:

$$d = \frac{0.6495}{N}$$

حيث d = عمق السن، in (m).

N = عدد الأسنان لكل إنش (عدد الأسنان لكل ميليمتر).

2. سن أكم برغي Acme:

$$d = \frac{0.500}{N} + 0.010\ \ in$$

3. السن المربع (انظر الشكل 6.5):

$$d = \frac{0.500}{N}$$

4. سن دودي 20° (الشكل 6.5):

$$d = \frac{0.6866}{N}$$

5. سن Buttress:

$$d = \frac{0.750}{N}$$

ويحسب العمق الكلي للمسنن (ويعبر عادة عن العمق الكلي للسن) بالعلاقات التالية:

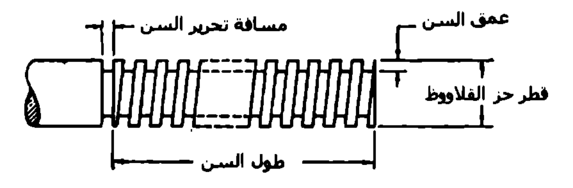
1. المسنن المستقيم القياسي:

$$D = \frac{2.157}{P}$$

حيث

D = العمق الكلي للسن.

P = الخطوة القطرية.



الشكل 6.5 : عناصر القلاووظ المربع أو acme أو الدودي.

2. المسنن المائل:

$$D = \frac{2.157}{P}$$

3. للمسنن المائل المخروطي:

$$D = \frac{1.888}{P}$$

4. للمسنن الدودي:

$$D = 0.6866P$$

حيث P = الخطوة الخطية.

5. للمسنن المخروطي:

$$D = \frac{2.157}{P}$$

حيث P = الخطوة القطرية العمودية.

عمليات تشغيل القلاووظ

تعطى معادلة زمن تشغيل القلاووظ بالعلاقة:

الزمن = (طول القطع) (سن لكل إنش) / سرعة الدوران rpm

(وبنظام اللوالب العالمية يؤخذ عدد الأسنان في كل ميليمتر).

كما ويعطى زمن تشغيل وإنتاج أسنان لوالب دودية أو مربعة أو acme بالعلاقة:

$$T = \frac{LDdn}{4(fpm)(f)}$$

حيث

T = الزمن اللازم لتشغيل القلاووظ، min.

L = طول القلاووظ، in (mm).

D − القطر الرئيسي للقلاووظ.

d − عمق السن.

n − عدد الأسنان في كل إنش (ميليمتر).

fpm − سرعة القطع، ft/min.

f − عمق القطع لكل شوط.

الزمن اللازم للقلوظة بذكور القلاووظ

يعطى الزمن اللازم لقلوظة الأسنان ضمن القطعة بالعلاقة:

$$T = \frac{ND\pi}{8(fpm)}$$

حيث

T − الزمن بالدقائق لقلوظة 1.0 إنش (25.4 mm) ضمن الصامولة أو إخراجها بنفس المسافة.

N − عدد الأسنان لكل إنش (ميليمتر).

D − قطر ذكر القلاووظ in (mm).

π − 3.1416.

fpm − سرعة القطع، ft/min (m/min).

الزمن اللازم لإجراء التفريز الجانبي

يعطى الزمن اللازم لإجراء التفريز الجانبي للقطعة بالعلاقة:

$$\text{الزمن} = \frac{\text{طول القطع}}{\text{(التغذية لكل سن) (عدد الأسنان) (سرعة الدوران rpm)}}$$

يمكن أن يحدد طول القطع إما بالإنش أو بالميليمتر.

الزمن اللازم لتبديل أداة القطع للمقشطة

تعطى وحدة الزمن اللازمة لتبديل أداة القطع للمقشطة بالعلاقة:

$$\text{وحدة الزمن} = \frac{\text{(الزمن اللازم لتبديل أداة القطع) (زمن التفريز لكل قطعة)}}{\text{عمر الأداة}}$$

سرعة القطع للمقشطة

توجد هناك معادلتان تفيدان في حساب سرعة القطع عندما نعلم عدد الأشواط بالدقيقة وطول كل شوط، أو نستطيع حساب عدد الأشواط بالدقيقة إذا علمنا سرعة القطع وطول الشوط.

$$CS = \frac{NL}{6}$$

$$N = \frac{6(CS)}{L}$$

حيث

N = عدد الأشواط بالدقيقة للذراع الحامل للأداة.

L = طول الشوط.

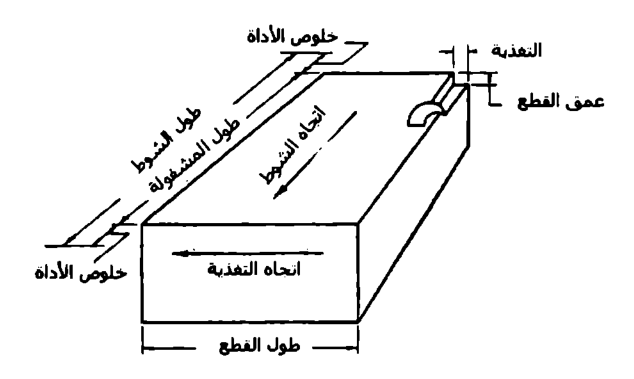
CS = سرعة القطع، ft/min (m/min).

زمن القطع على المقشطة

يعطى الزمن اللازم لقطع القطعة على المكنة بالعلاقة:

$$\text{الزمن} = \frac{\text{طول القطع}}{\text{(عدد الأشواط بالدقيقة)}}$$

نستطيع استخدام هذه المعادلة أيضاً لحساب زمن التسوية:



الشكل 6.6 : عناصر عمل المقشطة

معدل التغذية للمجلخة المركزية

يُعطى معدّل التغذية للمشغولة:

$$F = \pi d N \sin \alpha$$

F − تغذية المشغولة، in/min (mm/min).

d − قطر الدولاب المعدّل (المنظّم)، in (mm).

N = سرعة دوران الدولاب المنظم، rpm.

α = زاوية ميل الدولاب المنظم.

زمن التجليط

تعطي المعادلات التالية قيماً تقريبية لزمن التجليخ لمتوسط عمل منجز في ورشة.

من أجل التجليخ الخشن:

$$T = \frac{LT_S D}{(w/2)F(4CS)}$$

أو

$$T = \frac{LT_S D}{2wF(CS)}$$

من أجل تجليخ نهائي (تجليخ إنهاء):

$$T = \frac{LT_S D}{wF(CS)}$$

حيث

T = الزمن، min.

L = طول المشغولة.

T_s = الكمية الكلية للمادة المزالة.

D = قطر المشغولة.

w = عرض وجه دولاب الجلخ.

F = التغذية أو عمق القطع.

CS = سرعة القطع، ft/min (m/min).

وجود الثابت 1/2 في معادلة التحليخ الخشن تعني أن التغذية الطولية ستكون بنصف وجه الدولاب لكل دورة للعمل. وتعطي النسبة T/F عدد مرات القطع اللازمة لإزالة الكمية المزالة بكاملها، وتعتبر D/4CS هي مقلوب 4CS/D في معادلة الدوران.

زمن تفريز القلاووظ

يعطى زمن التفريز بالعلاقة:

$$\text{الزمن} = \frac{\text{طول القطع}}{\text{(التغذية لكل سن) (عدد الأسنان) (سرعة الدوران rpm)}}$$

الزمن اللازم للبشر

تعطى بشكل عام المعادلة التي تحسب الزمن اللازم للبشر:

$$\text{الزمن} = \frac{\text{طول الشوط}}{\text{سرعة القطع}} + \frac{\text{طول الشوط}}{\text{سرعة العودة}}$$

سرعة المشغولة وسرعة أداة قطع المسننات (التسنين)

تعطى معادلتي سرعة المشغولة وسرعة أداة قطع المسننات (مِقْطَع):

$$HR = (WR)\,(N)$$

أو

$$WR = \frac{HR}{N}$$

حيث

WR = عدد دورات المحور الحامل للمشغولة، rpm.

HR = سرعة دوران حامل أداة القطع، rpm.

N = عدد أسنان المسنن أو عدد الأخاديد.

الزمن اللازم لتشغيل مسنن مستقيم

تعطى المعادلة التي تقدر زمن التشغيل (تفريز) مسنن مستقيم بالعلاقة:

$$T = \frac{N(L + A)}{F(rpm)}$$

حيث

T = زمن القطع، min.

N = عدد أسنان المسنن التي ستشكّل.

L = وجه المسنن أو طول السن.

A = اقتراب حامل أداة القطع (المسافة التي سيتقدمها حامل أداة القطع حتى يصل إلى كامل عمق القطع).

F = تغذية حامل أداة القطع (دورة لحامل الأداة/mm) دورة لحامل الأداة/in.

rpm = سرعة دوران حامل أداة القطع، rpm.

يمكن تحديد عدد الأسنان التي ستشكل وطول وجه المسنن من المخططات والرسوم التصميمية، كما ويتم حساب تقدم أداة القطع، بينما يتم إيجاد اقتراب حامل الأداة وسرعة دوران الحامل من جداول التوصيات أو الجداول الموصى بها.

ويحسب مقدار اقتراب حامل الأداة من المشغولة وفق المعادلة:

$$A = \sqrt{d(D-d)}$$

حيث

A − مقدار الاقتراب، in (mm).

D − قطر حامل الأداة، in (mm).

d − العمق الكلي لسن المسنن، in (mm).

زمن تأشر (تخديد المحاور)

يُحسب زمن إجراء (تخديد) لمحور عبر طريقة حامل الأداة بالعلاقة:

$$T = \frac{N(L+A)}{KF(rpm)}$$

حيث

T − الزمن، min.

N − عدد الأخاديد.

L − طول الأخاديد.

A − الاقتراب، in (mm).

K − التغذية لكل أخدود، in (mm).

F − عدد الأخاديد على أداة التخديد.

rpm − سرعة دوران الحامل لأداة التخديد، rpm.

الزمن اللازم للنشر بمنشار المعادن

$$\text{زمن النشر} = \frac{\text{طول القطع}}{\text{(عدد الأشواط بالدقيقة) (التغذية لكل شوط)}}$$

الزمن اللازم للنشر بمنشار شريطي (شَلَة)

$$\text{زمن النشر} = \frac{\text{طول القطع، in(mm)}}{\text{[سرعة القطع، ft/min(m/min)] (خطوة المنشار) (التغذية لكل سن)}}$$

خطوة المنشار = عدد الأسنان لكل إنش (ميليمتر).

استطاعة المحرك المطلوبة لإنجاز عمليات القطع بالخراطة

لقد أعطت شركة Carboloy المعادلة التالية:

الآلة A	استطاعة المحرك hp (تشغيل) قطع B
تقدر الاستطاعة اللازمة للتغلب على الاحتكاك داخل الآلة بحوالي 30 % من B	حساب الاستطاعة المطلوبة لكل أداة، باستخدام المعادلة المعطاة أدناه أدوات تقوم بالقطع بآن واحد — hp - (DFSC) الأداة الأولى - (DFSC) الأداة الثانية - .. الخ - الاستطاعة الكلية المطلوبة لأدوات القطع B

الجدول 6.1 ثوابت الاستطاعة لمعادن مختلفة

المادة	ثابت الاستطاعة	المادة	ثابت الاستطاعة
Magnesium alloy	3	Cast iron, medium	4
Aluminum castings	3	Cast iron, soft	3
Aluminum bar stock	4	Copper	4
Brass, hard	10	SAE X1112	3
Brass, soft	4	SAE X4130	4
Bronze, soft	10	Stainless steel	4
Bronze, soft	4	Monel metal	5
Cast iron, hard	5		

لقد استخدمت المعادلة التالية لإنجاز الحسابات السابقة:

$$hp = DFSC$$

حيث

D - عمق القطع، in (mm).

F - التغذية، in (mm).

S - سرعة السطح، ft/min (m/min).

C - ثابت الاستطاعة يؤخذ من الجدول السابق.

لاحظ أن: hp × 0.746 = KW.

7

معادلات التدفئة والتهوية والتكييف

معادلات التكييف

قوانين المروحة

يقاس تدفق الهواء لمروحة مركزية بالقدم المكعب بالدقيقة (cubic feet per minute (m^3/min) (CFM))، ويتغير تبعاً لسرعة دوران دولاب المروحة (RPM) كما يلي:

$$\frac{CFM_2}{CFM_1} = \frac{RPM_2}{RPM_1}$$

ويتعلق الضغط الستاتيكي SP والمقاس بعمود (mm) in من الماء بتدفق الهواء مقاساً بـ (CFM) أو RPM وبالتالي:

$$\frac{SP_2}{SP_1} = \left(\frac{CFM_2}{CFM_1}\right)^2 = \left(\frac{RPM_2}{RPM_1}\right)^2$$

كما وتتعلق استطاعة الدخل للمروحة (معبراً عنها باستطاعة الكبح (brake horsepower bhp (KW) بتدفق الهواء وRPM والضغط الستاتيكي وذلك لكي تؤمن التدفق المطلوب، وبالتالي:

$$\frac{BHP_2}{BHP_1} = \left(\frac{CFM_2}{CFM_1}\right)^3 = \left(\frac{RPM_2}{RPM_1}\right)^3 = \left(\frac{SP_2}{SP_1}\right)^{1.5}$$

وتحتاج استطاعة الكبح الداخلة للمروحة إلى إدخال مردود المروحة بعين الاعتبار لكي تتمكن من تأمين التدفق المطلوب، ويقدر مردود المروحة FAN_{eff} بحوالي (65 - 85)%، وتصبح علاقة استطاعة الكبح كما يلي:

$$BHP = \frac{CFM \times SP \times SP.GR.}{6356 \times FAN_{eff}}$$

كمــا وتقاد المروحة بمحرك كهربائي M/D الذي يملك بدوره مردوداً يتراوح بين $M/D_{eff} = (80 - 95)\ \%$، وبالتالي نستطيع كتابة استطاعة المحرك وفق العلاقة:

$$MHP = \frac{BHP}{M / D_{eff}}$$

يعتبر حجم المروحة (أي قطر دولابها) ثابتاً في هذه المعادلة، طالما أننا نعتبر أن كثافة الهواء ثابــتة خــلال عمل المروحة، كما يعتبر الوزن النوعي للهواء المنقول (specific gravity) SP.GR له القيمة = 1.0.

معادلات تغيير الهواء

تعطــى نسبة تغيير الهواء بالساعة (AC/HR) لتدفق هواء (m^3/min) ft^3/min CFM ولغرفة بحجم (m^3) VOLUME ft^3 بالعلاقة:

$$\frac{AC}{HR} = \frac{CFM \times 60}{VOLUME}$$

أو إذا علمــنا معدل تغيير الهواء بالساعة لحيز عبارة عن حجم ثابت عندها يعطى تدفق الهواء المطلوب بالعلاقة:

$$CFM = \frac{AC / HR \times VOLUME}{60}$$

معادلات تدفق الهواء

يــرتبط الضغط الكلي TP ضمن قناة التهوية مقدراً بالإنش (mm) عمود ماء مع الضــغط الستاتيكي SP أيضاً مقدراً بالإنش (mm) عمود ماء، والضغط الناتج عن السرعة VP مقدراً بالإنش (mm) عمود ماء بالعلاقة:

$$TP = SP + VP$$

إذ يعطى الضغط الناتج عن السرعة أو ضغط السرعة Velocity pressure VP، بالإنش (mm) عمود ماء مع سرعة الهواء V ft/min بالعلاقة:

$$VP = \left(\frac{V}{4005}\right)^2 = \frac{V^2}{4005^2}$$

لاحظ بأن: إنش ماء × 25.4 = ميليمتر عمود ماء.

كما وتعطى سرعة الهواء V, ft/min ضمن قناة التهوية بمعدل تدفق Q ft^3/min خلال قناة مساحة مقطعها A ft^2 بالعلاقة:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q \times 144}{W \times H}$$

لاحظ أيضاً:

$$\text{ft/min} \times 0.3408 = \text{m/min}$$

الآن لمعرفة القطر المكافئ D_{EQ} لقناة تهوية دائرية المقطع مكافئة لقناة بمقطع مستطيل عرضه A وارتفاعه B تستطيع تطبيق العلاقة:

$$D_{EQ} = \frac{1.3(AB)^{0.625}}{(A+B)^{0.25}}$$

معادلات التسخين والتبريد بالهواء

تعطى كمية الحرارة المحسوسة H_S لجريان هواء بتدفق CFM وفرق درجات حرارة ΔT، °F بالعلاقة:

$$H_S = 1.08 \times \text{CFM} \times \Delta T$$

كما تعطى كمية الحرارة الكامنة لنفس الجريان H_L بوجود فرق بنسبة الرطوبة ΔW_{GR}، (ماء lb/هواء جاف gr) بالعلاقة:

$$H_L = 0.68 \times CFM \times \Delta W_{GR}$$

وعندما تعطى نسبة الرطوبة بالباوند من الماء لكل باوند من الهواء الجاف، عندها تعطى الحرارة الكامنة بالعلاقة:

$$H_L = 4840 \times CFM \times \Delta W_{LB}$$

وتعطى كمية الحرارة الكلية H_T لفرق في الانثالبي Δh، هواء جاف Btu/lb، بالعلاقة:

$$H_T = 4.5 \times CFM \times \Delta h$$

كما نستطيع إيجاد الحرارة الكلية أيضاً عبر جمع الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة كما يلي:

$$H_T = H_S + H_L$$

وبالتالي تصبح نسبة الحرارة المحسوسة SHR كما يلي:

$$SHR = \frac{H_S}{H_T} = \frac{H_S}{H_S + H_L}$$

عندما يمزج تدفق هواء خارجي CFM_{OA} مع الهواء العائد من الغرفة CFM_{RA} ويكونان هواء التزويد CFM_{SA}، عندها تعطى درجة حرارة الهواء الممزوج T_{MA} بالعلاقة:

$$T_{MA} = \left(T_{ROOM} \times \frac{CFM_{RA}}{CFM_{SA}}\right) + \left(T_{OA} \times \frac{CFM_{OA}}{CFM_{SA}}\right)$$

حيث

T_{ROOM} = درجة الحرارة التصميمية للغرفة.

T_{OA} = درجة حرارة الهواء الخارجي، وتعطى أيضاً درجة حرارة الهواء الممزوج بالعلاقة:

$$T_{MA} = \left(T_{RA} \times \frac{CFM_{RA}}{CFM_{SA}} \right) + \left(T_{OA} \times \frac{CFM_{OA}}{CFM_{SA}} \right)$$

نواتج التكثيف المتشكلة في مكيفات الهواء

تعطى نسبة تشكل نواتج التكثيف في مكيفات الهواء، ويرمز لها GPM_{ACCOND}، لتدفق هواء CFM (ft³/min) لحجم معين من الهواء (هواء جاف ft³/lb) SV، ولتغيير محدد ΔW_{LB}، (هواء الجاف lb/ماء lb) بالعلاقة التالية:

$$GPM_{ACCOND} = \frac{CFM \times \Delta W_{lb}}{SV \times 8.33}$$

ولرطوبة محددة ΔW_{GR} ، (هواء جاف lb/ماء gr) تصبح كما يلي:

$$GPM_{ACCOND} = \frac{CFM \times \Delta W_{GR}}{SV \times 8.33 \times 7000}$$

ويعطى تدفق البخار المطلوب، lb/h، وكمية الحرارة الكامنة H_{FG} للتبخر، Btu/lb، عند الضغط التصميمي للمنشأة بالعلاقة:

$$\frac{LBSTM}{HR} = \frac{BTU/HR}{H_{FG}}$$

أخيراً، تعطى كمية الحرارة المنقولة الإجمالية H، Btu/h، خلال مساحة A، ft²، ولفرق درجة حرارة ΔT، °F، بالعلاقة:

$$H = U \times A \times \Delta T$$

معادلات توازن الهواء المطلوب

يعطى تدفق هواء التزويد SA مقدراً بالقدم المكعب بالدقيقة بدلالة الهواء المعاد RA والهواء الخارجي OA والهواء المطروح EA والهواء المبدَّل RFA بالعلاقة:

$$SA = RA + OA = RA + EA + RFA$$

عـــندما يتفوق تدفق الهواء الخارجي الممتص OA على الهواء المطروح EA، عندها يعطى تدفق الهواء الخارجي بالعلاقة:

$$OA = EA + RFA$$

أمـــا عندما يتفوق تدفق الهواء المطروح EA على الهواء الخارجي الأصغري الممتص OA، عندها يعطى تدفق الهواء الخارجي بالعلاقة:

$$OA = EA \qquad RFA = 0$$

أما إذا أخذت الدورة الاقتصادية بالحسبان أثناء التصميم فعندها:

$$OA = SA = EA + RFA \qquad RA = 0$$

معادلات ترطيب الغرفة

تعـــرّف الحبيـــبات أو قطرات الرطوبة المطلوبة لتحقيق ترطيب الغرفة بالفرق بين قطرات الماء لكل قدم مكعب من هواء الغرفة (برطوبة محددة لـــ W قطرات لكل باونـــد من الهواء الجاف ولحجم نوعي من الهواء SV، هواء جاف ft^3/lb) ولمثيلاتها لهواء التزويد، أو:

$$GRAINS_{REQ'D} = \left(\frac{W_{GR}}{SV}\right)_{ROOM\,AIR} - \left(\frac{W_{GR}}{SV}\right)_{SUPPLY\,AIR}$$

وتعطـــى كمية الرطوبة بالباوند المطلوبة لتحقيق الترطيب، وذلك عندما يعبّر عن الرطوبة النوعية بالباوند من الماء لكل باوند هواء جاف، بالعلاقة:

$$POUNDS_{REQ'D} = \left(\frac{W_{LB}}{SV}\right)_{ROOM\,AIR} - \left(\frac{W_{LB}}{SV}\right)_{SUPPLY\,AIR}$$

كمـــا ويعطـــى تدفق البخار المطلوب بالباوند في الساعة لإنتاج الرطوبة المطلوبة بالعلاقة:

$$\mathrm{LB\,STM/HR} = \frac{\mathrm{CFM} \times \mathrm{GRAINS}_{\mathrm{REQ'D}} \times 60}{7000}$$
$$= \mathrm{CFM} \times \mathrm{POUNDS}_{\mathrm{REQ'D}} \times 60$$

ولتحديد ربح المرطب من كمية الحرارة المحسوسة H_S، Btu/h، لتدفق بخار Q، lb/h، وفـــرق درجات الحرارة T بين حرارة البخار وحرارة هواء التزويد، ولمرطب ذو طول قناة الدخول L، ft، استخدم العلاقة:

$$H_S = 0.244 \times Q \times \Delta T + L \times 380$$

تحديد درجة حرارة تكاثف قطرات البخار على زجاج النوافذ

ستتكاثف الرطوبة الموجودة في الهواء على زجاج النوافذ عندما تكون درجة حرارة الزجاج T_{GLASS} أقل من درجة حرارة نقطة الندى DP_{ROOM} لهواء الغرفة أو:

$$T_{GLASS} = T_{ROOM} - \left[\frac{R_{IA}}{R_{GLASS}} \times (T_{ROOM} - T_{OA})\right]$$

حيث

T – درجة الحرارة، °F.

R – قيمة R، $h.ft^2.°F/Btu$.

U – قيمة U، $Btu/(h.ft^2.°F)$.

IA – فيلم (طبقة) الهواء الداخلي.

OA – درجة حرارة الهواء الخارجي التصميمية.

DP – نقطة الندى.

وعندما تستخدم U الإجمالية للزجاج:

$$T_{GLASS} = T_{ROOM} - \left[\frac{U_{GLASS}}{U_{IA}} \times (T_{ROOM} - T_{OA}) \right]$$

وسيحدث التكاثف إذا كان $T_{GLASS} < DP_{ROOM}$.

معادلات خصائص الهواء في مكيفات الهواء

تعطى الرطوبة النوعية W للهواء المستخدم في مكيفات الهواء، هواء جاف lb/ماء (gr) lb، بالعلاقات:

$$W = 0.622 \times \frac{P_W}{P - P_W}$$

$$W = \frac{(2501 - 2.381 T_{WB})(W_{SATWB}) - (T_{DS} - T_{WB})}{2501 + 1.805 T_{DB} - 4.186 T_{WB}}$$

$$W = \frac{(1093 - 0.556 T_{WB})(W_{SATWB}) - 0.240(T_{DB} - T_{WB})}{1093 + 0.444 T_{DB} - T_{WB}}$$

حيث:

W – الرطوبة النوعية: $lb\ H_2O/lb\ DA$ أو $gr\ H_2O/lb\ DA$.

W_{ACTUAL} – الرطوبة الفعلية، $lb\ H_2O/lb\ DA$ أو $gr\ H_2O/lb\ DA$.

W_{SAT} – رطوبة الإشباع النوعية عند استخدام مقياس الحرارة الجاف (ذو بصيلة جافة).

W_{SATWB} – رطوبة الإشباع النوعية عند استخدام مقياس الحرارة الرطب (ذو بصيلة رطبة).

P_W – الضغط الجزئي لبخار الماء، lb/ft^2.

P – الضغط المطلق الكلي لمزيج الهواء وبخار الماء، lb/ft^2.

P_{SAT} – ضغط الإشباع الجزئي لبخار الماء عند استخدام مقياس الحرارة الجاف، lb/ft.

RH – الرطوبة النسبية، %.

H_S – كمية الحرارة المحسوسة، Btu/h.

H_L – كمية الحرارة الكامنة، Btu/h.

H_T – الحرارة الكلية، Btu/h.

m – التدفق الكتلي، للهواء الجاف أو الماء lb/h.

cp – الحرارة النوعية (للهواء 0.24 Btu/lb DA، وللماء 1.0 Btu/lb H_2O).

T_{DB} – درجة الحرارة باستخدام مقياس الحرارة الجاف، °F.

T_{WB} – درجة الحرارة باستخدام مقياس الحرارة الرطب، °F.

ΔT – فرق درجات الحرارة، °F.

ΔW – فرق الرطوبة النوعية، lb H_2O/lb DA أو gr H_2O/lb DA.

Δh – فرق الإنثالبي، Btu/lbDA.

L_v – الحرارة الكامنة للتبخر، Btu/LB H_2O.

تعطى الرطوبة النسبية RH للهواء بالعلاقتين:

$$RH = \frac{W_{ACTUAL}}{W_{SAT}} \times 100\%$$

$$RH = \frac{P_W}{P_{SAT}} \times 100\%$$

وتحسب كمية الحرارة المحسوسة والكامنة والكلية وفق المعادلات:

$$H_S = mc_P \times \Delta T$$

$$H_L = L_V m \times \Delta W$$

$$H_T = m \times \Delta h$$

معادلات نظام مبرّد الماء

تعطى كمية الحرارة الكلية H المزالة بنظام مبرِّد الماء في نظام التكييف بالهواء بالعلاقة:

$$H = 500 \times GPM \times \Delta T$$

كما ويعطى معدّل التدفق في مبخر الماء GPM_{EVAP} بالعلاقة:

$$GPM_{EBAP} = \frac{TONS \times 24}{\Delta T}$$

بينما يعطى معدّل التدفق في المكثف GPM_{COND} بالعلاقة:

$$GPM_{COND} = \frac{TONS \times 30}{\Delta T}$$

حيث

H – كمية الحرارة الكلية، Btu/h.

GPM – معدّل تدفق الماء، gal/min.

ΔT – فرق درجات الحرارة، °F.

TONS – حمل التكييف، tons.

GPM_{EVAP} – معدّل تدفق الماء في المبخّر، gal/min.

GPM_{COND} – معدّل تدفق الماء في المكثّف، gal/min.

معادلات برج التبريد

تعتـــبر درجـــتا حرارة الاقتراب لبرج التبريد $APPROCH_{CT'S}$ وللمبادل الحراري $APPROCH_{HE'S}$ قيمتان هامتان لحساب أداء برج التبريد والمبادل الحراري، وتعطى درجات الحرارة هذه بالعلاقات:

$$APPROACH_{CTS} = LWT - AWB$$

$$APPROACH_{HE'S} = EWT_{HS} - LWT_{CS}$$

$$RANGE = EWT - LWT$$

حيث

EWT = درجة حرارة الماء الداخل (°F).

LWT = درجة حرارة الماء الخارج (°F).

AWB = درجة حرارة المحيط بمقياس الحرارة الرطب (تصميم WB، °F).

HS = الطرف الساخن.

CS = الطرف البارد.

ومن أجل برج التبريد نفسه يمكننا كتابة:

$$C = \frac{E + D + B}{D + B}$$

$$B = \frac{E - (C - 1)D}{C - 1}$$

$$E = GPM_{COND} \times R \times 0.0008$$

$$D = GPM_{COND} \times 0.0002$$

$$R = EWT - LWT$$

B = تدفق ماء الدسع، gal/min.

C = دارات التجميع.

D = الانجراف، gal/min.

E = التبخر، gal/min.

EWT = درجة حرارة الماء الداخل، °F.

LWT = درجة حرارة الماء الخارج، °F.

R = مجال درجات الحرارة، °F.

معادلات نظام التسخين

ضياعات الضغط في انابيب البخار

لنعتبر أن التدفق ثابت في الأنبوب (الشكل 7.1)، ولنفرض P_1 الضغط الستاتيكي للمائع عند النقطة الأولى، وP_2 الضغط الستاتيكي في نقطة أخرى تبعد L عن النقطة الأولى.

يعطى انخفاض الضغط الناتج عن احتكاك المائع بالأنبوب نتيجة اجتيازه للمسافة L بالعلاقة:

$$P = p_1 - p_2$$

وبالتعبير عن قوانين الاحتكاك الواردة سابقاً بصيغة جبرية نستطيع أن نكتب:

$$Pa = FSDv^2$$

حيث

P = الانخفاض في الضغط، lb/ft^2.

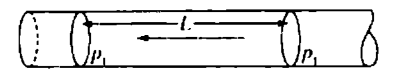
a = مساحة مقطع الأنبوب، ft^2.

F = عامل يتعلق بطبيعة المائع وبطبيعة سطح الأنبوب.

S = مساحة التماس بين المائع والأنبوب، ft^2.

D = كثافة المائع، lb/ft^3.

v = سرعة الجريان، ft/s.



الشكل 7.1

وبالتالي:

$$P = \frac{1}{a} FSDv^2$$

وإذا عوضنا قيمة F بالقيمة الاختيارية = f/2g، عندها ستصبح المعادلة السابقة كما يلي:

$$P = \frac{1}{a} fSD \frac{v^2}{2g}$$

ومن أجل الأنابيب الدائرية التي لها القطر d والطول L، بالتالي $S = \pi.d.L$، و$a = \pi d^2/4$، وبالتعويض نجد:

$$P = \frac{4fLDv^2}{d^2 g}$$

وإذا فرضنا أن W يمثل وزن المتدفق بالباوند لكل دقيقة، عندها

$$w = \frac{\pi d^2}{4} \times vD \times 60 = 47.12d^2 vD$$

و

$$v = \frac{w}{47.12d^2 D}$$

ولنفرض أن P يمثل مقدار انخفاض الضغط بالباوند لكل إنش مربع = P/144، إذا فرضنا d_1 القطر بالإنش = 12d وبالتعويض نجد:

$$P = 0.04839 \frac{fw^2 L}{Dd_1^5}$$

يعطى العامل f وفق ما حدده Unwin كما يلي:

$$f = K\left(1 + \frac{3}{10d}\right) = K\left(1 + \frac{3.6}{d_1}\right)$$

وتستخدم القيمة الأشهر للعامل K للبخار التي حددها العالم Babock 0.0027، وبالتعويض نجد:

$$p = 0.0001306 w^2 L \frac{1 + 3.6/d_1}{Dd_1^5}$$

حيث

P = انخفاض الضغط، lb/in^2.

w = وزن البخار المتدفق، lb/min.

L = طول الأنبوب، ft.

d_1 – قطر الأنبوب، in.

D – الكثافة الوسطية للبخار، lb/ft^3.

معادلات مسخنات الماء الساخن ذات الحجم المنزلي

$$H_{OUTPUT} = GPH \times 8.34LBS/GAL \times \Delta T \times 1.0$$

$$H_{INPUT} = \frac{GPH \times 8.34LBS/GAL \times \Delta T}{\%EFFICIENCY}$$

$$GPH = \frac{H_{INPUT} \times \%EFFICIENCY}{\Delta T \times 8.34LBS/GAL}$$

$$= \frac{KW \times 3413BTU/KW}{\Delta T \times 8.34LBS/GAL}$$

$$\Delta T = \frac{H_{INPUT} \times \%EFFICIENCY}{GPH \times 8.34LBS/GAL}$$

$$= \frac{KW \times 3413BTU/KW}{GPH \times 8.34LBS/GAL}$$

$$KW = \frac{GPH \times 8.34LBS/GAL \times \Delta T \times 1.0}{3413BTU/KW}$$

$$\%COLD\ WATER = \frac{T_{HOT} - T_{MIX}}{T_{HOT} - T_{COLD}}$$

$$\%HOT\ WATER = \frac{T_{MIX} - T_{COLD}}{T_{HOT} - T_{COLD}}$$

حيث

H_{OUTPUT} – استطاعة التسخين، خرج.

H_{INPUT} – استطاعة التسخين، دخل.

GPH – التدفق المستخلص، gal/h.

ΔT – ارتفاع درجة الحرارة، °F.

KW = كيلو واط.

T_{COLD} = درجة حرارة الماء البارد، °F.

T_{HOT} = درجة حرارة الماء الساخن، °F.

T_{MIX} = درجة حرارة الماء الممزوج، °F.

استطاعة التسخين للمشعات والمبادلات

تعطى استطاعة التسخين للمشع بالعلاقة:

Btu المنبعثة في الساعة لغرفة درجة حرارتها °70 ودرجة حرارة البخار °215 =

(lb/h كتلة مكثفة) × 970 × عامل تصحيح. (.........)

حيث يعطى عامل التصحيح كما يلي:

$$C_s \text{ عامل التصحيح} = \left(\frac{(215 - 70)}{\text{درجة حرارة الغرفة} - \text{متوسط درجة حرارة البخار}} \right)^{1.3}$$

تعطى كمية الحرارة المنبعثة من مبادل التسخين بالبخار بنفس المعادلة (*) السابقة ولكن بعامل تصحيح يعطى كما يلي:

$$C_s = \left(\frac{215 - 65}{t_s - t_i} \right)^{1.5}$$

حيث

C_s = معامل التصحيح الذي سيطبق في المعادلة (*) السابقة.

t_s = درجة حرارة البخار المعاكسة بالتجربة.

t_i = متوسط درجة حرارة الهواء الداخل المقاسة بالتجربة.

لقد تم وضع القوة 1.5 تجريبياً وذلك لتعطي الشكل المناسب للمبادلات.

ويعطـــي معامل التصحيح المستخدم في مبادلات التسخين بالماء الساخن بالعلاقة التالية:

$$C_W = \left[\frac{\theta_S - 65}{(\theta_1 + \theta_2)/2 - t_i}\right]^{1.5}$$

C_W = معامل التصحيح المستخدم في مبادلات التسخين بالماء الساخن.

θ_s = إحدى درجات حرارة الماء الوسطية القياسية 170، 190، 210، 230°.

θ_1 = درجة حرارة الدخول للماء، deg.

θ_2 = درجة حرارة الخروج للماء، deg.

تقدير هواء التزويد للغرفة اعتماداً على محتوى Co_2

يُحسب هواء التزويد لكل قاطن (ساكن بالغرفة) وفق قياس نسبة غاز ثاني أكسيد الكـــربون Co_2 كمـــا يلي، مفترضين بأن معدَّل إنتاج الفرد الواحد من غاز ثاني أكسيد الكربون مقدراً بـــ CFH هو 0.6 ft^3/h.

$$\frac{\mathrm{CFH}(\mathrm{CO_2} - X)}{10{,}000} = 0.6$$

حيث

CFH = الهواء الواجب تزويده للغرفة لكل قاطن، ft^3/h.

Co_2 = نســبة غاز ثاني أكسيد الكربون في هواء الغرفة مقدراً بجزء لكل 10,000 جزء.

X – نســبة غازٍ ثاني أكسيد الكربون في الهواء الخارجي مقدراً بجزء لكل 10,000 جزء (يؤخذ عادةً 4)

ومنه

$$CFH = \frac{6000}{CO_2 - X}$$

المردود واستطاعة الدخل لمروحة الهواء

نســتطيع تحديد الاستطاعة اللازمة لتحريك الهواء ضمن مجاري الهواء عبر تطبيق المعادلات التالية، ولكن دعنا أولاً نفرض ما يلي:

p – الضغط الكلي مقدراً بعمود ماء، in.

a – مساحة مقطع مجرى الهواء، ft^2.

v – سرعة الهواء، ft/min.

وبعــد تطبيق عوامل التحويل المناسبة لتغيير واحدة الضغط الكلي إلى الباوند لكل قدم مربع، نحصل على ما يلي:

$$Ahp = \frac{pav \times 144}{12 \times 2.31 \times 33{,}000}$$

أو

$$Ahp = 0.000157\ pav$$

حيث يُمثل الرمز Ahp الاستطاعة اللازمة لتحريك الهواء بالحصان البخاري، وإذا كان q يمثل حجم الهواء المار خلال دقيقة بالقدم المكعب فعندها:

$$q = a\,v$$

وبالتالي:

$$Ahp = 0.000157pq = \frac{pq}{6356}$$

حيث يقدر الضغط p هنا بالإنش من الماء.

وإذا كان الضغط معبراً عنه بارتفاع عمود مكافئ من الهواء، h، فتصبح العلاقة:

$$Ahp = \frac{hDQ}{33,000}$$

حيث

D - كثافة الهواء، lb/ft^3.

Q - تدفق الهواء، ft^3/min.

يعتـــبر فرق الضغط الفعلي للمروحة هو جزء من فرق الضغط الناتج عنها بشكل نظـــري v^2/g، ويـــؤخذ عـــادةً بشكل تقريبي على الشكل $k\ v^2/g$، ولذلك تعطى الاستطاعة المطلوبة بالحصان البخاري Hp لقيادة المروحة بالعلاقة:

$$Hp = \frac{ckv^2}{g} \times \frac{DQ}{33,000}$$

حيث يمثل الرمز c عامل يأخذ بالحسبان مقدار الضياعات الميكانيكية في المروحة، وبتجميع كل العوامل الثابتة بعامل واحد نحصل على العلاقة:

$$Hp = Kv^2QD$$

حيث يصبح الرمز v هنا دالاً على السرعة المحيطية والتي تتغير مباشرةً بتغير سرعة دوران المـــروحة، وبمـــا أن Q تتغير أيضاً بتغير السرعة، فعندها تصبح الاستطاعة المطلوبة تابعة لمكعب السرعة.

يعرَّف مردود المروحة الستاتيكي على أنه حاصل ضرب المردود الميكانيكي بالنسبة بـين الضـغط الستاتيكي إلى الضغط الكلي، ويحدد المردود الميكانيكي ME وفق العلاقة التالية:

$$ME = \frac{Ahp}{\text{input Hp}}$$

$$ME = \frac{pq}{6356\,Hp}$$

حيث يعبر الرمز Hp عن استطاعة الدخل مقدرة بالحصان البخاري.

$$\text{المردود الستاتيكي } SE = \frac{pq}{6356\ Hp} \times \frac{\text{الضغط الستاتيكي}}{\text{الضغط الكلي}}$$

$$SE = \frac{p_s q}{6356\ Hp}$$

حيث

P_s = الضغط الستاتيكي.

قطر مجرى الهواء الدائري المقطع المكافئ للمجرى المستطيل

يعطـى قطر مجرى الهواء الدائري المقطع المكافئ في المقاومة والتدفق للمجرى ذي المقطع المستطيل ببعدين A وB بالعلاقة التالية:

$$D = 1.265\sqrt[5]{\frac{(AB)^3}{A+B}}$$

حيث يمثل A وB ضلعي المجرى المستطيل وD يمثل قطر المجرى الدائري المقطع.

ضياعات الضغط في مجاري الهواء

يعـــرف التعـــبير العـــام المحدد لاحتكاك الموائع ضمن الأنابيب بالمعادلة المروحية (Fanning formula) ويمكن تطبيقها بشكل تقريبي على الهواء كما يلي:

$$p = f\frac{S}{a}D\frac{v^2}{2g}$$

حيث

P = الضغط المطلوب للتغلب على الاحتكاك، lb/ft^2.

a = مساحة مقطع المجرى، ft^2.

D = كثافة الهواء، lb/ft^2.

v = السرعة، ft/s.

f = عامل الاحتكاك.

S = مساحة التماس (المحيط × الطول).

ومـــن أجـــل هواء نظامي (عند درجة حرارة °70 وبضغط زئبقي بمقياس الضغط الجوي. 29.92 in) تصبح العلاقة:

$$p = \frac{0.03FL}{d^{1.24}}\left(\frac{v}{1000}\right)^{1.84}$$

حيث

F = عامل الخشونة.

L = طول المجرى، ft.

d = قطر المجرى، in.

P, v كما في المعادلة السابقة.

الكبح الناتج عن وجود مصفاة هواء مغبرة

يعبر عن الكبح الناتج عن وجود الغبار في الفلتر عادةً بنسبة مئوية كما يلي:

$$E = 1 - \frac{G_1}{G_0}$$

حيث

E = الكبح.

G_1 = تركيز الغبار خلف المصفاة.

G_2 = تركيز الغبار أمام المصفاة.

تمثل قدرة التقاط الغبار لمصفاة غير آلية بكمية أو وزن الغبار القياسي الذي ستلتقطه المصفاة بدون أن تتجاوز المقاومات التالية:

0.18 in من أجل الأنواع ذات المقاومة المنخفضة.

0.5 in من أجل الأنواع ذات المقاومة المتوسطة.

1.00 in من أجل الأنواع ذات المقاومة العالية.

تفيدنا هذه المقاومات في تصنيف المصافي، حيث تستخدم المصافي ذات المقاومة المنخفضة عادةً في العمل في أفران الهواء الساخن وفي وحدات تكييف الهواء. وتستخدم المصافي ذات المقاومة المتوسطة في أنظمة المراوح المركزية، بينما تعتبر المصافي ذات المقاومة العالية مناسبة أكثر لتنقية الهواء الداخل إلى الضواغط أكثر منها في تنقية هواء أنظمة تكييف الهواء.

كمية الحرارة المنتقلة عبر الجدار

يعبر عن الربح في كمية الحرارة عبر الجدار بالعلاقة التالية:

$$H = H_t + H_R$$

حيث

H_t = كمية الحرارة التي يتم ربحها والناتجة عن اختلاف درجات حرارة الهواء.

$$H_t = AU(t_o - t)$$

حيث

A = مساحة الجدار، ft^2.

U = عامل انتقال الحرارة، $Btu/(ft^2.h.°F)$.

t_o = درجة حرارة الهواء الخارجي، °F.

t = درجة حرارة الهواء داخل الغرفة، °F.

و

$$H_R = AFaI$$

حيث

H_R = الربح الحراري الناتج عن الإشعاع الشمسي.

A = مساحة الجدار أو السطح، ft^2.

F = القسم الممتص من الإشعاع الشمسي والمنتقل إلى الداخل، يعبر عنه بكسر عشري.

a = قسم من الإشعاع الشمسي المرتطم بالجدار والممتص من قبل سطح الجدار، يعبر عنه بكسر عشري.

I = الكثافة الحقيقية للإشعاع الشمسي المصطدم بالسطح، $Btu/(h.ft^2)$.

تتبع قيمة F عامل انتقال الحرارة للجدار، وذلك وفق العلاقة التقريبية التالية:

$$F = 0.23U$$

بالتعويض تصبح المعادلة السابقة كما يلي:

$$H_R = 0.23AUal$$

تعطى المراجع الهندسية قيمتي العاملين a وI.

فرق درجات الحرارة الوسطي لوشائع تبريد نظام الماء المبرّد

تعتمد كمية الحرارة المنقولة عبر وشائع تبريد نظام الماء المبرّد على فرق درجات الحرارة الوسطي MTD بين الهواء والماء في الأنابيب، والتي يمكن حسابها من العلاقة:

$$\mathrm{MTD} = \frac{(t_a - t'_w) - (t'_a - t_w)}{\ln[(t_a - t'_w)/(t'_a - t_w)]}$$

حيث

MTD = فرق درجات الحرارة الوسطي، °F.

t_a = درجة حرارة الهواء الداخل، °F.

t'_a = درجة حرارة الهواء الخارج، °F.

t_w = درجة حرارة الماء الداخل، °F.

t'_w = درجة حرارة الماء الخارج، °F.

ويحدد مقدار سطح التبادل بالعلاقة:

$$S = \frac{H}{K \times \mathrm{MTD}}$$

حيث

S = سطح الوشيعة، ft^2.

H = كمية الحرارة المحسوسة المنقولة، Btu/h.

MTD = فرق درجات الحرارة الوسطي، °F.

K = عامل نقل $Btu/(h.ft^2.°F)$.

يعتمد عامل النقل K على تصميم الوشيعة وسرعة الماء.

تعتمد كمية الماء المدارة على كمية الحرارة الكلية المنقولة من الهواء (كمية الحرارة المحسوسة وكمية الحرارة الكامنة) وعلى ارتفاع درجة حرارة الماء المسموح به.

مردود برج التبريد

تحـــد درجة حرارة الهواء الرطبة من الفاعلية العظمى النظرية لبرج التبريد، ويعطى مردود التبريد بالعلاقة:

$$E = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t}$$

حيث

t = درجة حرارة الهواء الرطبة.

t_1 = درجة حرارة الماء الداخل للبرج.

t_2 = درجة حرارة الماء المغادر للبرج.

تتراوح قيمة المردود عادةً بين 70 و75 بالمئة، كما ويبرد الماء عادةً ضمن مجال من 10° إلى 15°، وتـــتعلق درجة حرارة الماء المغادر للبرج بشكل كبير بدرجة الحرارة الرطبة الخارجية.

تصمم في بعض الأحيان غرف رش (مثل غاسل هواء مناسب) في حال كون حجم البرج محدوداً وتستخدم لتبريد ماء التكاثف.

تُفقد كمية من الماء من برج التبريد نتيجة التبخر وتيارات الحمل، وعلى سبيل المثال تفقد في أنظمة التبريد التي تستخدم وسيط تبريد مثل F-12 ما مقداره 0.06 غالون بالدقيقة لكل طن تبريد، وتقدر كمية الماء المستجرة من شبكة المدينة والضائعة (بدون وجود برج تبريد) من 1.5 إلى 2 غالون بالدقيقة لكل طن تبريد، وذلك تبعاً لدرجة حرارة الماء. لذلك من المفروض أن توفر أبراج التبريد حوالي 90 إلى 95 بالمئة من الماء المستجر من الشبكة.

معادلات التسخين وتكييف الهواء بنظام USCS وSI

ستعطى المعادلات التالية وفق نظام USCS ثم بواحدات نظام SI، وهكذا سنحقق مقارنة سهلة للمعادلات وفق واحدات الجملتين، وسنورد الاختصارات والرموز المستخدمة في المعادلات بعد استعراض المعادلات.

يستطيع المهندس الميكانيكي أن يحسب النتائج وفق نظامي الواحدات والمقارنة بينهما ليختار الأنسب.

$$H_S = 1.08 \frac{\text{Btu.min}}{\text{h.ft}^3.°\text{F}} \times \text{CFM} \times \Delta\text{T}$$

$$H_{SM} = 72.42 \frac{\text{kJ.min}}{\text{h.m}^3.°\text{C}} \times \text{CMM} \times \Delta T_M$$

$$H_L = 0.68 \frac{\text{Btu.min.lb DA}}{\text{h.ft}^3.\text{gr H}_2\text{O}} \times \text{CFM} \times \Delta W$$

$$H_{LM} = 177{,}734.8 \frac{\text{kJ.min.kg DA}}{\text{h.m}^3.\text{kg H}_2\text{O}} \times \text{CMM} \times \Delta W_M$$

$$H_T = 4.5\frac{\text{lb.min}}{\text{h.ft}^3} \times \text{CFM} \times \Delta\text{h}$$

$$H_{TM} = 72.09\frac{\text{kg.min}}{\text{h.m}^3} \times \text{CMM} \times \Delta h_M$$

$$H_T = \text{H}_S + \text{H}_L$$

$$H_{TM} = \text{H}_{SM} + \text{H}_{LM}$$

$$H = 500\frac{\text{Btu.min}}{\text{h.gal.}^\circ\text{F}} \times \text{GPM} \times \Delta T$$

$$H_M = 250.8\frac{\text{kJ.min}}{\text{h.L.}^\circ\text{C}} \times \text{LPM} \times \Delta T_M$$

$$\frac{\text{AC}}{\text{HR}} = \frac{\text{CMM} \times 60\,\text{min/h}}{\text{VOLUME}}$$

$$\frac{\text{AC}}{\text{HR}_M} = \frac{\text{CMM} \times 60\,\text{min/h}}{\text{VOLUME}_M}$$

$$^\circ\text{C} = \frac{^\circ\text{F} - 32}{1.8}$$

$$^\circ\text{F} = 1.8^\circ\text{C} + 32$$

حيث

H_S - كمية الحرارة المحسوسة، Btu/h.

H_{SM} - كمية الحرارة المحسوسة، KJ/h.

H_L - كمية الحرارة الكامنة، Btu/h.

H_{LM} - كمية الحرارة الكامنة، KJ/h.

H_T, H - كمية الحرارة الكلية، Btu/h.

H_{TM}, H_M - كمية الحرارة الكلية، KJ/h.

ΔT - فرق درجات الحرارة، °F.

ΔT_M – فرق درجات الحرارة، °C.

ΔW – فرق نسبة الرطوبة، gr H_2O/lb DA.

ΔW_M – فرق نسبة الرطوبة، Kg H_2O/Kg DA.

Δh – فرق الانثالبي، Btu/lb DA.

Δh_M – فرق الانثالبي، KJ/Kg DA.

CFM – معدَّل تدفق الهواء، ft^3/min.

CMM – معدَّل تدفق الهواء، m^3/min.

GPM – معدَّل تدفق الماء، gal/min.

LPM – معدَّل تدفق الماء، L/min.

AC/HR – نسبة تغيير الهواء بالساعة، وفق النظام الإنكليزي.

AC/HR_M – نسبة تغيير الهواء بالساعة، وفق النظام SI.

$AC/HR = AC/HR_M$.

VOLUME – حجم الفراغ، ft^3.

$VOLUME_M$ – حجم الفراغ، m^3.

$$KJ/h = Btu/h \times 1.055$$

$$CMM = CFM \times 0.02832$$

$$LPM = GPM \times 3.785$$

$$KJ/Kg = Btu/lb \times 2.326$$

$$m = ft \times 0.3048$$

$$m^2 = ft^2 \times 0.0929$$

$m^3 = ft^3 \times 0.02832$

$Kg = lb \times 0.4536$

1.0 GPM = 500 lb بخار/h

1.0 lb بخار/h = 0.002 GPM

1.0 lb H_2O/h = 1.0 lb بخار/h

(الكثافة) $Kg/m^3 = lb/ft^3 \times 16.017$

(الحجم النوعي) $m^3/Kg = ft^3/lb \times 0.0624$

Kg H_2O/Kg DA = gr H_2O/lb DA / 7000 = lb H_2O/lb DA

المعادلات التبادلية بين التدفق وانخفاض ضغط أنابيب البخار

$$\Delta P = \frac{0.01306 W^2 (1 + 3.6 / ID)}{3600 \times D \times ID^5}$$

$$W = 60 \sqrt{\frac{\Delta P \times D \times ID^5}{0.01306 \times (1 + 3.6 / ID)}}$$

$$W = 0.41667 V A_{\text{INCHES}} D = 60 V A_{\text{FEET}} D$$

$$V = \frac{2.4W}{A_{\text{INCHES}} D} = \frac{W}{60 A_{\text{FEET}} D}$$

حيث

ΔP - هبوط الضغط لكل 100 قدم من الأنبوب (psig/100 ft).

W - معدّل تدفق البخار، lb/h.

ID - القطر الداخلي الفعلي للأنبوب، in.

D - الكثافة الوسطية للبخار عند الضغط العامل ضمن النظام، lb/ft^3.

V – سرعة البخار ضمن الأنبوب، ft/min.

A_{INCHES} – مساحة مقطع الأنبوب الفعلية، in^2.

A_{FEET} – مساحة مقطع الأنبوب الفعلية، ft^2.

معادلات نواتج التكثيف على الأنابيب

$$FS = \frac{H_{SSS} - H_{SCR}}{H_{LCR}} \times 100$$

$$W_{CR} = \frac{FS}{100} \times W$$

حيث

FS – البخار المتجمع، %.

H_{SSS} – كمية الحرارة المحسوسة عند ضغط تزويد البخار، Btu/lb.

H_{SCR} – كمية الحرارة المحسوسة عند ضغط التكاثف العائد، Btu/lb.

H_{LCR} – كمية الحرارة الكامنة عند ضغط التكاثف العائد، Btu/lb.

W – معدّل تدفق البخار، lb/h.

W_{CR} – التدفق المتكاثف كنسبة مئوية من البخار المتجمع الناتج عن عملية التكاثف، lb/h. استخدم هذه النسبة من تدفق البخار في معادلة البخار السابقة لتحديد حجم أنبوب التكاثف العائد.

معادلات مردود HVAC

$$\text{COP} = \frac{\text{BTU OUTPUT}}{\text{BTU INPUT}} = \frac{\text{EER}}{3.413}$$

$$\text{EER} = \frac{\text{BTU OUTPUT}}{\text{WATTS INPUT}}$$

معدل الاشعال الأصغري: معدّل الاشعال الأعظمي - نسبة الإنزال

(والتي هي بحوالي 5:1, 10:1, 25:1)

$$\text{OVER ALL THERMAL EFF} = \frac{\text{GROSS BTU OUTPUT}}{\text{GROSS BTU INPUT}} \times 100\%$$

$$\text{COMBUSTION EFF} = \frac{\text{BTU INPUT} - \text{BTU STACK LOSS}}{\text{BTU INPUT}} \times 100\%$$

مجال المردود الحراري الكلي % 90 - % 75.

مجال مردود الاحتراق % 95 - % 85.

معادلات غرفة الامتصاص المكافئة لنظام HVAC

إذا كانت الغرف المكافئة مغلقة تماماً:

$$CFM = 100 \times G^{0.5}$$

حيث

CFM - تدفق الهواء المطلوب إطراحه، ft^3/min.

G - كتلة وسيط التبريد للنظام الأكبر، lb.

أما إذا كانت الغرف المكافئة مغلقة جزئياً.

$$FA = G^{0.5}$$

حيث

FA - المساحة المفتوحة للامتصاص الحر، ft^2.

G - كتلة وسيط التبريد للنظام الأكبر، lb.

المعادلات البسايكومترية

لقد أخذنا المعادلات التالية من منشورات شركة Carrier (من كتاب NewYork، McGraw-Hill، Handbook of Air-Conditioning System Design)، وتغطي هذه المعادلات مجالات مزج الهواء وأحمال التبريد وعامل كمية الحرارة المحسوسة وعامل التمرير الجانبي ودرجات الحرارة عند الأجهزة ودرجة حرارة هواء التزويد وكمية الهـــواء وأمثال ثوابت الهواء. وسنعرّف قبل سرد المعادلات بالرموز والاختصارات التي سنستخدمها.

الاختصارات

adp - نقطة الندى للجهاز.

BF - عامل التمرير الجانبي.

(BF) (OALH) - كمية الحرارة الكامنة للهواء الخارجي الممرر جانبياً.

(BF) (OASH) - كمية الحرارة المحسوسة للهواء الخارجي الممرر جانبياً.

(BF) (OATH) - كمية الحرارة الكلية للهواء الخارجي الممرر جانبياً.

Btu/h - وحدة حرارية بريطانية في الساعة.

cfm - قدم مكعب في الدقيقة ft^3/min.

db - مقياس حرارة جانبي (بحوجلة جافة).

dp - نقطة الندى.

ERLH - كمية الحرارة الكاملة الفعالة للغرفة.

ERSH - كمية الحرارة المحسوسة الفعالة للغرفة.

ERTH - كمية الحرارة الكلية الفعالة للغرفة.

ESHF – عامل كمية الحرارة المحسوسة الفعّالة.

°F – درجة فهرنهايت.

fpm – قدم بالدقيقة، ft/min.

gpm – غالون بالدقيقة، gal/min.

gr/lb – حبات أو قطرات بالباوند.

GSHF – عامل كمية الحرارة المحسوسة الإجمالي.

FTH – كمية الحرارة الكلية الإجمالية.

GTHS – كمية الحرارة الكلية الإجمالية المضافة.

OALH – كمية الحرارة الكامنة للهواء الخارجي.

OASH – كمية الحرارة المحسوسة للهواء الخارجي.

OATH – كمية الحرارة الكلية للهواء الخارجي.

rh – الرطوبة النسبية.

RLH – كمية الحرارة الكامنة للغرفة.

RLHS – كمية الحرارة الكامنة الإضافية للغرفة.

RSH – كمية الحرارة المحسوسة للغرفة.

RSHF – عامل كمية الحرارة المحسوسة للغرفة.

RTH – كمية الحرارة الكلية للغرفة.

Sat Eff – قدرة الإشباع للرشاشات.

SHF – عامل كمية الحرارة المحسوسة.

TLH – كمية الحرارة الكامنة الكلية.

TSH – كمية الحرارة المحسوسة الكلية.

Wb – مقياس حرارة رطب (بحوجلة رطبة).

الرموز

Cfm_{ba} – كمية الهواء المار جانبياً حول الجهاز.

Cfm_{da} – كمية الهواء المزالة رطوبته.

Cfm_{oa} – كمية الهواء الخارجي.

Cfm_{ra} – كمية الهواء المعاد.

Cfm_{sa} – كمية هواء التزويد.

h – الانثالبي النوعي.

h_{adp} – انثالبي نقطة الندى للجهاز.

h_{es} – انثالبي درجة حرارة السطح الفعَّال.

h_{ea} – انثالبي الهواء الداخل.

h_{la} – انثالبي الهواء الخارج.

h_{m} – انثالبي الهواء الممزوج من الهواء الخارجي والهواء المعاد.

h_{oa} – انثالبي الهواء الخارجي.

h_{rm} – انثالبي هواء الغرفة.

h_{sa} – انثالبي هواء التزويد.

t – درجة الحرارة.

t_{adp} = درجة حرارة نقطة الندى للجهاز.

t_{edb} = درجة الحرارة الرطبة للهواء الداخل.

t_{es} = درجة حرارة السطح الفعّال.

t_{ew} = درجة حرارة الماء الداخل.

t_{ewb} = درجة الحرارة الرطبة للماء الداخل.

t_{ldb} = درجة الحرارة الجافة للهواء الخارج.

t_{lw} = درجة حرارة الماء الخارج.

t_{lwb} = درجة الحرارة الرطبة للهواء الخارج.

t_{m} = درجة الحرارة الجافة للهواء الممزوج من الهواء الخارجي والهواء المعاد.

t_{oa} = درجة الحرارة الجافة للهواء الخارجي.

t_{rm} = درجة الحرارة الجافة للغرفة.

t_{sa} = درجة الحرارة الجافة لهواء التزويد.

W = الرطوبة النوعية أو محتوى الرطوبة.

w_{adp} = محتوى رطوبة نقطة الندى للجهاز.

W_{ea} = محتوى الرطوبة للهواء الداخل.

W_{es} = محتوى رطوبة درجة حرارة السطح الفعّال.

W_{la} = محتوى رطوبة الهواء الخارج.

W_{m} = محتوى رطوبة الهواء الممزوج من الهواء الخارجي والهواء المعاد.

W_{oa} = محتوى رطوبة الهواء الخارجي.

W_{rm} – محتوى رطوبة الغرفة.

W_{sa} – محتوى رطوبة هواء التزويد.

معادلات مزج الهواء (الهواء الخارجي والهواء المعاد)

$$t_m = \frac{(cfm_{oa} \times t_{oa}) + (cfm_{ra} \times t_{rm})}{cfm_{sa}}$$

$$h_m = \frac{(cfm_{oa} \times h_{oa}) + (cfm_{ra} \times h_{rm})}{cfm_{sa}}$$

$$W_m = \frac{(cfm_{oa} \times W_{oa}) + (cfm_{ra} \times W_{rm})}{cfm_{sa}}$$

معادلات حمل التبريد

ERSH = RSH + (BF) (OASH) + RSHS[†]

ERLH = RLH + (BF) (OALH) + RLHS[†]

ERTH = ERLH + ERSH

TSH = RSH + OASH + RSHS[†]

TLH = RLH + OALH + RLHS[†]

GTH = TSH + TLH + GTHS[†]

$RSH = 1.08^{‡} \times cfm_{sa} \times (t_{rm} - t_{sa})$

$RLH = 0.68^{‡} \times cfm_{sa} \times (W_{rm} - W_{sa})$

[†] تعتبر الأحمال GTHS وRLHS وRSHS هي أحمال تكميلية وتعتبر ككمية حرارة يكتسبها مجرى الهواء، وضياعات التسرب من المجرى والربح الحراري الناتج عن استطاعة المروحة والمضخة.

[‡] انظر قيم أمثال ثوابت الهواء التي سنقوم بحسابها لاحقاً.

$RTH = 4.45^{‡} \times cfm_{sa} \times (h_{rm} - h_{sa})$

$RTH = RSH + RLH$

$OASH = 1.08 \times cfm_{oa} (t_{oa} - t_{rm})$

$OALH = 0.68 \times cfm_{oa} (W_{oa} - W_{rm})$

$OATH = 4.45 \times cfm_{oa} (h_{oa} - h_{rm})$

$OATH = OASH + OALH$

$(BF)(OATH) = (BF)(OASH) + (BF)(OALH)$

$ERSH = 1.08 \times cfm_{da}^{§} \times (t_{rm} - t_{adp})(1 - BF)$

$ERLH = 0.68 \times cfm_{da}^{§} \times (W_{rm} - W_{adp})(1 - BF)$

$ERTH = 4.45 \times cfm_{da}^{§} \times (h_{rm} - h_{adp})(1 - BF)$

$TSH = 1.08 \times cfm_{da}^{§} \times (t_{edb} - t_{ldb})^{†}$

$TLH = 0.68 \times cfm_{da}^{§} \times (W_{ea} - W_{la})^{†}$

$GTH = 4.45 \times cfm_{da}^{§} \times (h_{ea} - h_{la})^{†}$

معادلات عوامل كمية الحرارة المحسوسة

$$RSHF = \frac{RSH}{RSH + RLH} = \frac{RSH}{RTH}$$

$$ESHF = \frac{ERSH}{ERSH + ERLH} = \frac{ERSH}{ERTH}$$

$$GSHF = \frac{TSH}{TSH + TLH} = \frac{TSH}{GTH}$$

§ عندما يكون هناك هواء محرر جانبياً حول أجهزة التكييف، $cfm_{da} = cfm_{sa}$.

معادلات عامل التمرير الجانبي

$$BF = \frac{t_{ldb} - t_{adp}}{t_{edb} - t_{adp}} \qquad 1 - BF = \frac{t_{edb} - t_{ldp}}{t_{edb} - t_{adp}}$$

$$BF = \frac{W_{la} - W_{adp}}{W_{ea} - W_{adp}} \qquad 1 - BF = \frac{W_{ea} - W_{la}}{W_{ea} - W_{adp}}$$

$$BF = \frac{h_{la} - h_{adp}}{h_{ea} - h_{adp}} \qquad 1 - BF = \frac{h_{ea} - h_{la}}{h_{ea} - h_{adp}}$$

معادلات درجة الحرارة عند الأجهزة

$$t_{edb} = \frac{(\text{cfm}_{oa} \times t_{oa}) + (\text{cfm}_{ra} \times t_{rm})}{cfm_{sa}}$$

$$t_{ldb} = t_{adp} + BF(t_{edb} - t_{adp})$$

تعـــتمد كلـــتا درجتي الحرارة t_{ewb} و t_{lwb} على القيم المحسوبة للانثالبي h_{ea} و h_{la} على المخطط البسايكرومتري.

$$h_{ea} = \frac{(\text{cfm}_{oa} \times h_{oa}) + (\text{cfm}_{ra} \times h_{rm})}{cfm_{sa}}$$

$$h_{la} = h_{adp} + BF(h_{ea} - h_{adp})$$

معادلة درجة حرارة هواء التزويد

$$t_{sa} = t_{rm} - \frac{\text{RSH}}{1.08\text{cfm}_{sa}}$$

معادلات كميات الهواء

$$cfm_{da} = \frac{ERSH}{1.08(1 - BF)(t_{rm} - t_{adp})}$$

$$cfm_{da} = \frac{ERLH}{0.68(1 - BF)(W_{rm} - W_{adp})}$$

$$cfm_{da} = \frac{ERTH}{4.45(1 - BF)(h_{rm} - h_{adp})}$$

$$cfm_{da} = \frac{TSH}{1.08(t_{edb} - t_{ldb})}$$

$$cfm_{da} = \frac{TLH}{0.68(W_{ea} - W_{la})}$$

$$cfm_{da} = \frac{GTH}{4.45(h_{ea} - h_{la})}$$

$$cfm_{sa} = \frac{RSH}{1.08(t_{rm} - t_{sa})}$$

$$cfm_{sa} = \frac{RLH}{0.68(W_{rm} - W_{sa})}$$

$$cfm_{sa} = \frac{RTH}{4.45(h_{rm} - h_{sa})}$$

$$cfm_{ba} = cfm_{sa} - cfm_{da}$$

ملاحظة: ستكون قيمة Cfm_{da} أقل من Cfm_{sa} فقط عندما يمرر الهواء جانبياً حول تجهيزات التكييف.

$$cfm_{sa} = cfm_{oa} + cfm_{ra}$$

† عندما تساوي قيم t_{rm} وW_{rm} وh_{rm} لقيم الدخل لأجهزة التبريد، فإنه يمكن استبدالهم بالقيم t_{edb} وW_{ea} وh_{ea} على التوالي.

أمثال ثوابت الهواء

$$1.08 = 0.244 \times \frac{60}{13.5}$$

حيث

0.244 = الحرارة النوعية للهواء الرطب عند الدرجة 70 °Fdb و 50 % rh، (Btu/F°.lb DA).

60 = دقيقة بالساعة.

13.5 = الحجم النوعي للهواء الرطب عند 70 °Fdb و 50 % rh.

$$0.68 = \frac{60}{13.5} \times \frac{1076}{7000}$$

حيث

60 = دقيقة بالساعة.

13.5 = الحجم النوعي للهواء الرطب عند 70 °F db و 50 % rh.

1076 = متوسط كمية الحرارة الواجب طرحها لتكثيف ليبرة واحدة من بخار الماء الموجود في هواء الغرفة.

7000 = gr/lb.

$$4.45 = \frac{60}{13.5}$$

تدل الأرقام على نفس دلالتها في العلاقة السابقة.

المعادلات في حال وجود مصائد بخار

يعتمد اختيار تركيب مصائد البخار على ماسورات البخار الصاعدة على حمل تسخين الأنبوب وعلى حمل الإشعاع الحراري الصادر عن الأنبوب. ويقصد بحمل تسخين الأنبوب نواتج التكثيف التي تتشكل عند تسخين سطح الأنبوب عندما يمر البخار لأول مرة. وللحصول على نتائج عملية يجب أن تكون درجة حرارة الأنبوب النهائية مساوية لدرجة حرارة البخار. ويمكن تحديد حمل تسخين الأنبوب وفق العلاقة:

$$C_1 = \frac{W(t_f - t_i)(0.114)}{h_l T}$$

حيث

C_l = التكاثف الناتج عن التسخين، lb/h.

W = الوزن الكلي للأنبوب، lb (يؤخذ من جداول المراجع الهندسية).

t_f = درجة حرارة الأنبوب النهائية، °F (درجة حرارة البخار).

t_i = درجة حرارة الأنبوب الابتدائية، °F (تؤخذ عادة مساوية لحرارة الغرفة).

0.114 = ثابت الحرارة النوعية للأنابيب الفولاذية أو أنابيب الحديد المطاوع (0.092 للأنابيب النحاسية).

h_l = الحرارة الكامنة للبخار، Btu/lb (يؤخذ من جداول البخار).

T = الزمن اللازم للتسخين، h.

أما حمل الإشعاع فهو نواتج التكاثف المتشكلة من ضياعات الإشعاع للأنابيب غير المعزولة والتي لا يمكن تجنبها.

ويحسب هذا الحمل من المعادلة التالية والذي يعتمد على الهواء الساكن المحيط بأنابيب البخار:

$$C_2 = \frac{LK(t_f - t_i)}{h_l}$$

حيث

C_2 = التكاثف الناتج عن الإشعاع، lb/h.

L = الطول الخطي للأنبوب، ft.

K = معامل النقل الحراري، Btu/(h.lin ft.°F).

يشـــكل حمل الإشعاع كما حمل التسخين قطرات تحت ظروف العمل الطبيعية، وتحدث ذروة هذا التشكل عند منتصف دورة التسخين، لذلك يضاف نصف حمل الإشعاع إلى حمل التسخين عندما يراد تحديد كمية نواتج التكاثف التي على مصائد البخار اصطيادها.

عامل الأمان

توصي الدراسات العملية الجيدة باستخدام عوامل أمان عندما يُراد اختيار مصائد الـــبخار، وربما نحتاج لعوامل أمان قد تصل من 2 إلى 1 أو بأعلى قيم من 8 إلى 1 وذلك للأسباب التالية:

1. قد يتغير ضغط البخار عند مدخل المصيدة أو الضغط الخلفي عند تفريغ المصيدة. وهذا يغير سعة مصيدة البخار.

2. إذا تمّ اختيار حجم المصيدة ليتناسب مع حمل العمل الطبيعي، فقد تعود نواتج الـــتكاثف إلى أنابـــيب البخار أو الأجهزة أثناء عملية الإقلاع أو أثناء عملية التسخين.

3. إذا تمّ اختـــيار المصــــيدة بحيث تفرغ كامل تدفق الماء وبشكل مستمر، فقد يصعب علينا إخراج الهواء من النظام.

وسنورد فيما يلي معلومات ترشدك إلى تقدير عامل الأمان:

الجدول 7.1 عوامل الأمان المأخوذة عند اختيار مصائد البخار

الجزء المراد تصميمه	عامل الأمان
خط تصريف البخار الرئيسي	3 إلى 1
صواعد تصريف البخار	2 إلى 1
بين المرجل ونهاية الخط الرئيسي	2 إلى 1
قبل صمام التخفيض	3 إلى 1
قبل صمام الإغلاق (في أوقات الإغلاق)	3 إلى 1
وشائع التصريف	3 إلى 1
أجهزة التصريف	3 إلى 1

عندما تريد استخدام مصيدة البخار في نظام ذي ضغط عمل عال، عليك تحديد فيما إذا كان النظام سيعمل تحت شروط ضغوط منخفضة عند أوقات محددة مثل منتصف الليل أو العطلة الأسبوعية، وإذا كان من المحتمل حدوث ذلك يجب إضافة عامل أمان إضافي لتتمكن المصيدة من التقاط القطرات المشكلة أثناء فترات العمل بضغط منخفض (خلال العمل الليلي).

8

معادلات الترموديناميك

مصطلحات وتعاريف

a = مساحة المكبس (مع انخفاضات المكبس وقضبان الذيل إن وجدت)، in^2 (mm^2).

C = ثابـــت وهو يساوي 12 للمحركات رباعية الشوط و20 للمحركات ثنائية الشوط.

C_p = الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت، [KJ/(Kg.°C)] Btu/(lb.°F).

C_v = الحرارة النوعية تحت حجم ثابت، [KJ/(Kg.°C)] Btu/(lb.°F).

c = الخلوص، ويعبر عنه بكسر عشري من الإزاحة.

D = إزاحة المكبس (دورة/m^3)، دورة/ft^3.

D' = إزاحة المكبس (دورة/m^3)، دورة/ft^3.

d = التجويف، قطر الاسطوانة الداخلي، in (mm).

F = القوة الصرفة عند نقطة دوران الذراع، lb (N).

g_c = عامل التحويل ويمثل الجاذبية الأرضية ($9.81\ m/s^2$) $32.2\ lbm.ft/(lbf.s^2)$.

h = الانثالبي (ويساوي $pv/J + u$)، Btu/lb (KJ/Kg).

h_s = فرق ضغط التوقف، سائل ft (m).

h_t = فرق الضغط الكلي، سائل ft (m).

h_v = فرق ضغط السرعة، سائل ft (m).

h''_w = فرق الضغط، in H_2O (mm H_2O).

h_1 = الانثالبي عند مدخل الضاغط، Btu/lb (KJ/Kg).

h_2 = الانثالبي عند مخرج (مصرف) الضاغط، Btu/lb (KJ/Kg).

J – المكافئ الميكانيكي للحرارة، 778 ft.lb/Btu.

k – نسبة الحرارة النوعية – C_p/C_v.

L – طول الشوط، ft (m).

– طول ذراع الكبح (المسافة من مركز المحور وحتى نقطة دوران الذراع)، ft (m).

l – طول الشوط، in.

m – الوزن المولي، lb (Kg).

$\dot{m}$ – عدد المولات، (Kg مول).

mep – الضغط الفعّال الوسطي، psi (KPa).

N – سرعة دوران المحور، rpm.

– عدد المراحل.

n – عدد الدورات المنجزة في الدقيقة.

– الأسُ البولوتروبي، حيث pv^n – ثابت العملية البوليتروبية.

P – الضغط، lbf/ft^2 (KPa).

p_1 – ضغط الدخول (التزويد)، lbf/in^2 (KPa).

p_2 – ضغط الخروج (التصريف)، lb/in^2 (KPa).

Δp – $p_c - p_b$ ارتفاع الضغط الناتج عن المضخة، lbf/in^2 (KPa).

Q – معدّل التدفق الحجمي، ft^3/min (m^3/min).

– كمية الحرارة المستخلصة (التي يمكن استخلاصها)، Btu/hb (KJ/hg).

Q_1 – كمية الحرارة المضافة، Btu/lb (KJ/Kg).

Q_2 = كمية الحرارة المطروحة، Btu/lb (KJ/Kg).

ΔQ = كمية الحرارة المضافة أو المستخلصة، Btu/lb (KJ/Kg).

R = ثابت الغاز، من خواص الغاز أو المزيج.

R' = ثابت الغاز العام ويساوي 1544 ft.lb/(lb.°R).

R_p = نسبة الضغوط = $\frac{p_2}{p_1}$.

R_{p1}, R_{p2}, R_{p3} = نسبة الضغوط للمراحل 1 و2 و3 على الترتيب.

R_t = نسبة درجات الحرارة = $\frac{T_2}{T_1}$.

R_v = نسبة الحجوم = $\frac{v_1}{v_2}$.

S = الانتروبي، Btu/(lb.°F) [KJ/(Kg.°C)].

shp = استطاعة محور المحرك بالحصان البخاري، hp (KW).

T = درجة الحرارة المطلقة.

T_1 = درجة حرارة كمية الحرارة المضافة، °R.

T_2 = درجة حرارة كمية الحرارة المطروحة، °R.

ΔT = انخفاض درجة الحرارة لغازات العادم خلال المبادل الحراري، °F (°C).

u = الطاقة الداخلية أو الذاتية، Btu/lb (KJ/Kg).

du = التغير في الطاقة الداخلية، Btu/lb (KJ/Kg).

$\bar{V}$ = السرعة، ft/s (m/s).

v = الحجم، ft^3 (m^3).

$\bar{v}$ = الحجم النوعي، ft^3/lb (m^3/Kg).

w = الوزن، lb (Kg).

$\overline{w}_f$ = كثافة السائل، lb/ft^3 (Kg/m^3).

$\overline{w}_w$ = كثافة الماء، $62.4\ lb/ft^3$ $(998.4\ Kg/m^3)$.

d_w = العمل، ft.lbf (N.m).

ΔW = العمل المنجز على أو من السائل، ft.lbf (N.m/Kg).

Z = الطاقة الناتجة عن الارتفاع، ft.lbf/lbm (N.m/Kg mass).

1 = شروط الدخول أو الشروط الابتدائية.

2 = شروط المغادرة أو الشروط النهائية.

معادلة الطاقة العامة

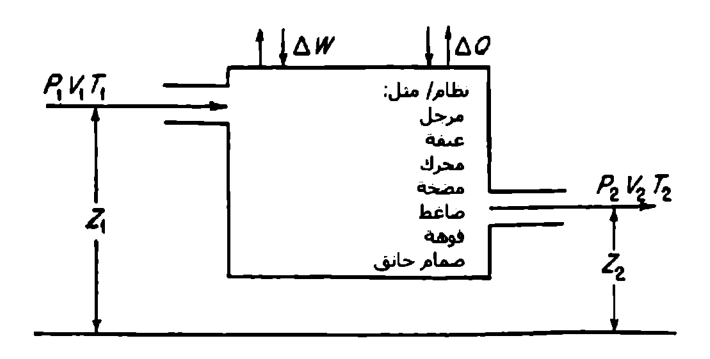
تعطى معادلة الطاقة العامة لحركة سائل ضمن نظام بالعلاقة:

$$Z_1 + \frac{\overline{V}_1^2}{2g_c} + p_1\overline{v}_1 + u_1 J = Z_2 + \frac{\overline{V}_2^2}{2g_c} + p_2\overline{v}_2 + u_2 J \pm W \pm \Delta QJ$$

أو

$$Z_1 + \frac{\overline{V}_1^2}{2g_c} + h_1 J = Z_2 + \frac{\overline{V}_2^2}{2g_c} + h_2 J \pm \Delta W \pm \Delta QJ$$

يجب أن تكون جميع الحدود متوافقة في نظام الواحدات (أي أن تكون واحدات جميع الحدود متجانسة ومن نفس النظام).



الشكل 8.1

قوانين الغازات

يعطى قانون Boyle للغازات المثالية وعند درجة حرارة ثابتة بالعلاقة:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = \text{const}$$

ويعطى قانون Charles عند ضغط ثابت بالعلاقة:

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$$

ويعطى قانون Gay-Lussac عند حجم ثابت بالعلاقة:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

دمج قوانين Boyle وCharles وGay-Lussac: إذا كانت درجة الحرارة والضغط يتغيران معاً عندها يعطى الحجم بالعلاقة:

$$v_2 = v_1 \frac{p_1}{p_2} \frac{T_2}{T_1}$$

معادلة خواص الغاز: يعطي دمج قانوني Boyle وCharles معادلة خواص الغاز المثالي:

$$pv = wRT$$

تؤخذ قيم R للغازات المختلفة من المراجع الهندسية.

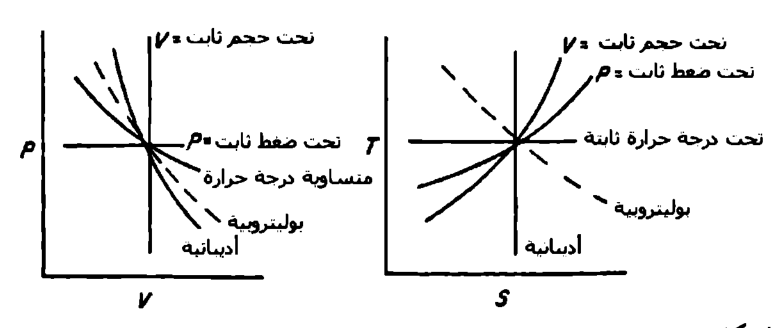
واعتماداً على فرضية Avogadro، تحتوي الحجوم المتساوية من الغازات عند نفس الضغط ونفس درجة الحرارة على عدد متساوي من الجزيئات – أو يحتل الوزن الجزيئي بالباوند لكل غاز نفس الحجم ($358.7\ ft^3$ عند الضغط 29.92 in Hg ودرجة الحرارة 32 °F). يمكن استخدام هذه الحقيقة وجعل المعادلة السابقة تعطي الشكل المولي لمعادلة خواص الغاز:

$$pv = \overline{m}R'T$$

لا تطبق هذه المعادلة أيضاً بشكل دقيق على الغازات الحقيقية، ولكن يمكننا استخدامها بدقة كافية للعديد من الحالات. ويمكننا إضافة عامل تصحيح على الطرف الأيمن من المعادلة السابقة لأخذ تأثير السلوك غير المثالي للغاز، حيث يضرب هذا العامل بالطرف الأيمن للمعادلة السابقة.

الأطوار أو العمليات المطبقة على الغازات المثالية (التامة)

إذا تمّ وضع كمية من الغاز التام ضمن حوجلة (جسم) أو نظام، فهناك خمس طرق مختلفة تحدد كيفية إضافة الطاقة أو الحصول عليها من ذلك النظام: عملية متساوية درجة الحرارة، عملية متساوية الانتروبي (أدياباتية)، عملية تحت حجم ثابت، عملية تحت ضغط ثابت، عملية بوليتروبية. ويوضح الشكل 8.2 هذه العمليات الخمس.



الشكل 8.2

سنورد في الجدول التالي المعادلات التي تحسب التغيرات في خصائص وأداء الغاز المثالي:

وتحسب قيمة الطاقة المضافة عبر تطبيق علاقة الطاقة التالية:

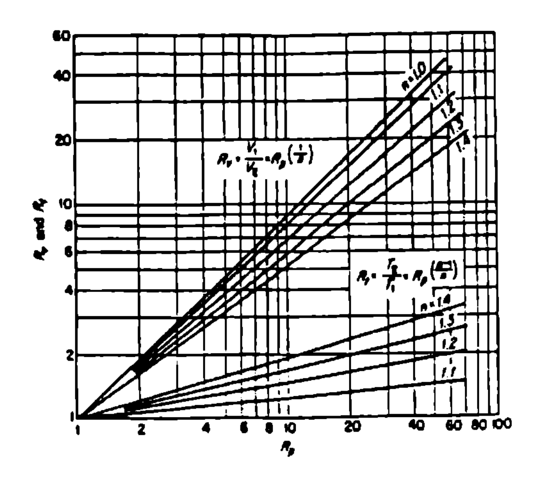
$$dQ = du + dw$$

وعند حساب تغيرات الضغط والحجم ودرجة الحرارة لقيم متغيرة للأسين n و k، فإن من المفيد أن نتذكر بأن النسب وارتفاع النسب للقوى الأسية يمكن استخدامها وحسابها كعمليات قسمة وضرب وذلك لإيجاد الأجوبة العددية، وسيفيدك الشكل 8.3 في هذه الحالة.

العملية	العلاقة بين $p.v.T$	العمل غير العكوس $\int_1^2 P\,dv$	Q	Δu	Δh	ΔS
(T = const) تحت درجة حرارة ثابتة	$p_1v_1 = p_2v_2$	$p_1v_1 \ln R_v$	$\frac{p_1v_1}{J} \ln R_v$	0	0	$\frac{wR}{J} \ln R_v$
تحت ضغط ثابت p = const)	$\frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1}$	$p(v_2 - v_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_v(T_2 - T_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_p \ln R_t$
تحت حجم ثابت (v = const)	$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}$	0	$wC_v(T_2 - T_1)$	$wC_v(T_2 - T_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_v \ln R_t$
(ايزوسروبية) (S = const)	$(p_1v_1)^k = (p_2v_2)^k$ $\frac{T_1}{T_2} = R_v^{k-1} = \left(\frac{1}{R_p}\right)^{(k-1)/k}$	$\frac{p_2v_2 - p_1v_1}{1-k}$	0	$wC_v(T_2 - T_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	0
بولتروبية (pv^n = const)	$(p_1v_1)^n = (p_2v_2)^n$ $\frac{T_1}{T_2} = R_v^{n-1} = \left(\frac{1}{R_p}\right)^{(n-1)/n}$	$\frac{p_2v_2 - p_1v_1}{1-n}$	$wC_v \frac{k-n}{1-n}(T_2 - T_1)$	$wC_v(T_2 - T_1)$	$wC_p(T_2 - T_1)$	$wC_v \frac{k-n}{1-n} \ln R_t$

ملاحظة : $R_v = \frac{v_2}{v_1}$ $\quad R_t = \frac{T_2}{T_1}$ $\quad R_p = \frac{p_2}{p_1}$

الجدول 8.1 : علاقات الغازات المثالية



الشكل 8.3

أداء الضواغط

المواصفات القياسية للضواغط الأديباتية/ايزونتروبية)

يبين الشكل 8.4 الدارة النظرية للضاغط حيث هناك ثلاث مراحل:

(1) الامتصاص من a إلى 1.

(2) الانضغاط من 1 إلى 2.

(3) الإفلات من 2 إلى b.

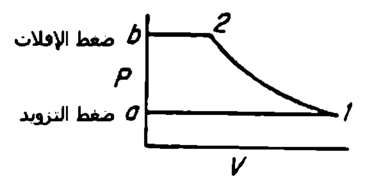
ويعطى العمل من أجل غاز مثالي ولضغط أديباتي عكوس (أو ايزونتروبي) ($pv^k = const$) بالعلاقة:

$$\Delta W_{\text{adiabatic cycle}} = 144 p_1 v_1 \left(\frac{k}{k-1}\right)(R_p^{(k-1)/k} - 1)$$

وإذا كـــان الانضغاط ايزونتروبياً ولغاز حقيقي معروف الخواص الترموديناميكية (مثل وسائط التبريد) عندها يعطى العمل لدورة واحدة لانضغاط تام وفق العلاقة:

$$\Delta W_{adiabatic\ cycle} = 778\ (h_2 - h_1)$$

تعطي المعادلتان السابقتان أجوبةً مثالية إذا كان الغاز تاماً.



الشكل 8.4

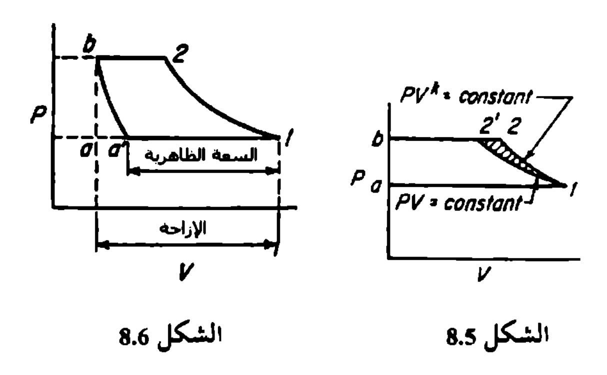
مواصفات الضاغط المتساوي درجة الحرارة

إذا تم تـــبريد الضـــاغط بشـــكل كبير لدرجة أن تبقى درجة الحرارة ثابتة خلال الانضـــغاط عندها سنحصل على عملية انضغاط متساوية درجة الحرارة، كما هو واضـــح على الشكل 8.5 (pv = const). وسيكون هناك أيضاً تخفيض للعمل أكثر من العملية الأديبانية، ويعطى العمل وفق هذه الحالة بالعلاقة:

$$\Delta W_{isothermal} = 144\ p_1 v_1 \ln R_p$$

مواصفات الضواغط متعددة المراحل

يـــنخفض عمل الضاغط عند استخدام الضغط متعدد المراحل مع تبريد الهواء بين المـــراحل، وإذا كـــان التبريد كاملاً ودخل الهواء إلى المرحلة الأخيرة بنفس درجة حرارة دخوله للضاغط، فعندها نقول بأن التبريد كان كاملاً وتاماً. عندها سيكون العمـــل المطلـــوب أصغرياً بقيم ضغط فريدة بين المراحل تدعى أفضل قيم ضغط مستَقبَل، ويحدد العمل وفق العلاقة:



الشكل 8.6

الشكل 8.5

$$R_{p1} = R_{p2} = R_{p3} = \ldots\ldots = R_p^{1/N}$$

وإذا كان الانضغاط ايزونتروبياً لكل مرحلة، أي أفضل ضغط مستقبل، مع وجود تبريد تام، عندها يعطى العمل اللازم لدورة نظرية وفق العلاقة:

$$\Delta W_{\text{multistage}} = 144 N p_1 v_1 \left(\frac{k}{k-1}\right)\left(R_p^{(k-1)/Nk} - 1\right)$$

ومــــن الجدير بالذكر أنه يمكن تطبيق العلاقة ($\Delta W_{isothermal} = 144 p_2 v_2 \ln R_p$) للعملية متساوية درجة الحرارة على عملية الانضغاط المفردة أو ذات المراحل.

السعة

يعـــبر عن السعة بحجم الهواء المعطى على أساس هواء حر "free air"، وتقاس هذه السعة عند الظروف المحيطية من ضغط ودرجة حرارة ورطوبة.

ومـــن أجل الآلات ذات الإزاحة الموجبة بدون خلوص، عندها يعطى الحجم كما في الشكل 8.6 بالفرق $v_1 - v_a$، والذي تحصل عليه من أبعاد الاسطوانات.

$$ft^3 / cycle = D = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right)\left(\frac{l}{1728}\right)$$ إزاحة المكبس

D' = إزاحة المكبس $$, ft^3 / \min = \frac{\pi d^2}{4} nl\left(\frac{l}{1728}\right)$$

$$= \frac{d^2 \ln}{2200}$$

وبمــا أن الآلة تملك خلوصاً يتراوح بين 2 و20 بالمئة من الإزاحة، أي هناك ضياع في إعـــادة التمدد الخلوصي، لذلك ستزاح النقطة a إلى الموضع 'a، ويصبح الطول $v'_a = v_l$ أقــل مــن الإزاحة $v_l - v_a$ في الشكل 8.6. ونستطيع حساب هذه السعة الظاهرية بالعلاقة:

$$\text{السعة الظاهرية} = D(1 + c - cR_p^{1/k})$$

ستكون السعة الحقيقية إذا ما قيست لضاغط حقيقي أقل من هذه القيمة الظاهرية بسبب حرارة الامتصاص وانخفاض ضغط الامتصاص وضياعات التسرب.

وتدعى نسبة السعة إلى الإزاحة بالمردود الحجمي، وإذا تم أخذ القياسات السابقة الحقيقية عندها:

$$\text{المردود الحجمي الفعلي \%} = \frac{\text{السعة الحقيقية المقاسة}}{\text{إزاحة المكبس}} \times 100$$

أما إذا استخدمنا السعة الظاهرية عندها نجد:

$$\text{المردود الحجمي الظاهري \%} = (1 + c - cR_p^{1/k}) \times 100$$

وتدعى النسبة بين هذين المردودين بمردود الانزلاق ويعطى بالعلاقة:

$$\text{مردود الانزلاق \%} = \frac{\text{المردود الحجمي الفعلي}}{\text{المردود الحجمي الظاهري}} \times 100$$

الاستطاعة النظرية للضواغط (KW)

يمكـــن تطبـــيق معادلات العمل النظري الأربعة السابقة على الضواغط متضمنة الخلوص، وذلك لأن العمل مستقل عن الخلوص.

وإذا كان معدّل التدفق الحجمي مساوياً للقيمة $100\ ft^3/min\ (m^3/min)$ عندها يمكن كتابة ما يلي:

$$\frac{\text{الاستطاعة لضغط أدياباتي أو ايزونتروبي (hp)}}{100\ ft^3/min} =$$

$$= \frac{k}{k-1}\frac{p_1}{2.292}(R_p^{(k-1)/k} - 1)$$
$$= \frac{(h_2 - h_1)\,lb/\min}{0.4242\bar{v}_1}$$

حيث

$\bar{v}_1$ = الحجم النوعي، ft^3/lb عند ضغط الدخول (أو التزويد):

$$\frac{\text{الاستطاعة لضغط متساوي درجة الحرارة (hp)}}{100\ ft^3/min} = \frac{p_1}{2.292}\ln R_p$$

وفي حالة كون الضاغط متعدد المراحل مع وجود تبريد تام وأفضل ضغط مستقبل يمكن كتابة:

$$\frac{\text{الاستطاعة لضغط أدياباتي أو ايزونتروبي}}{100\ ft^3/min} = \frac{Np_1}{2.292}\frac{k}{k-1}(R_p^{(k-1)/Nk} - 1)$$

مردود الضغط

تعطى النسبة بين الاستطاعة الفعلية المطلوبة للضاغط إلى الاستطاعة النظرية (لنفس السعة) بالعلاقة:

$$\text{مردود الضغط \%} = \frac{\text{الاستطاعة النظرية hp}}{\text{الاستطاعة الفعلية hp}} \times 100$$

يمكن إيجاد الاستطاعة النظرية من المعادلات الموجودة في الفقرة السابقة والتي تعطي قيم مردودي الضغط الأدياباتي أو المتساوي درجة الحرارة.

ويمكن حساب الاستطاعة الفعلية بالحصان أو (KW) من البطاقة الاسمية الخاصة بالضاغط والموجودة على اسطوانة الضاغط أو على محور الضاغط، أو يمكن أن تكون استطاعة الدخل الفعلية لمحرك وحدة القيادة الكهربائية، ويجب الانتباه إلى تحديد الأساس الذي حددنا وفقه الاستطاعة الفعلية.

أداء المروحة

تعتبر المروحة ضاغطاً ولكن مع إهمال التغير في كثافة الغاز قبل وبعد المروحة.

تعاريف

الهواء النظامي: الهواء عند الدرجة 68 °F وضغط 29.92 in HG، 5 % رطوبة نسبية، عندها ستكون كثافته $0.07488\ lb/ft^3$ وبحجم نوعي $13.3\ ft^3/lb$ وتعتبر هذه الشروط هي المرجع التي يتم وفقها قياس أداء المروحة.

السـعة: هي الحجم Q المسحوب من المروحة ويقدر بالقدم المكعب بالدقيقة (أو m^3/min).

فـرق الضغط (head): وهو الفرق بين الضغط على جانبي المروحة (طرف دخول الهواء للمروحة وطرف خروج الهواء من المروحة)، ويعبر عنه بارتفاع عمود المائع بالقـدم (متـر) أو إنش (ميليمتر) ماء، أو بالباوند لكل إنش مربع h''_w (الكيلو باسكال)، الخ.

ويمكن إعطاء معادلات التحويل بين واحدات الضغط المعبرة عن فرق الضغط كما يلي:

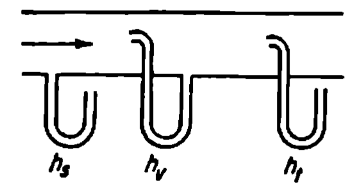
$$h_t = \frac{h''_w}{12}\frac{\overline{w}_w}{\overline{w}_f} \quad ft\,(m)\,fluid$$

$$h_t = 69.5h''_w \quad ft\,(m)\,std\ air$$

$$\text{الضغط} = \frac{h''_w}{27.7} \quad psi\,(kPa)$$

فرق الضغط الستاتيكي والضغط الناتج عن السرعة وفرق الضغط الكلي

كمـا هو مبين بالشكل 8.7 فإنه يمكن قراءة ثلاثة أنواع من الضغوط داخل مجرى الهـواء بعـد المـروحة، ويمكن الحصول على قراءة الضغط مباشرة من الضغط السـتاتيكي h_s، كما ويمكن الحصول على الضغط الناتج عن السرعة h_v من تدفق الغاز داخل المجرى والذي يجب تحديده كقيمة متوسطة مأخوذة من الأنبوب المواجه لحركة الهواء.



الشكل 8.7

وبالتالي يمكن إيجاد فرق الضغط الكلي وفق العلاقة:

$$h_t = h_s + h_v$$

ونستطيع إيجاد التحويل عبر تطبيق العلاقة:

$$Velocity = \sqrt{2g_c h_v} \quad \text{ft/s (m/s)}$$

وبإضافة التحويل نجد أن:

$$ht = \frac{h''w}{12}\frac{\overline{W}w}{\overline{W}f} \quad \text{ft(m) fluid}$$

$$Velocity = 1096.2\sqrt{\frac{h_w^{''}}{w_f}} \ \text{ft/min (m/min)}$$

وإذا تمّ استخدام شروط الهواء النظامي فإننا سنحصل على العلاقة التالية للسرعة:

$$Velocity = 4005\sqrt{h_w^{''}} \ \text{ft/min (m/min)}$$

يعـــتمد أداء المـــروحة بشكل رئيسي على فرق الضغط الستاتيكي وفرق الضغط الكلي، وستكون هذه الصيغة أكثر واقعية لأنها الصيغة الوحيدة لفرق الضغط التي يمكن استخدامها للتعبير عن مقاومة النظام.

استطاعة المروحة

تعطى الاستطاعة النظرية بالعلاقة التالية:

$$\text{Air hp (kW)} = \frac{Qh_w^{''}}{6355}$$

يمكن استخدام فرق الضغط الستاتيكي أو الكلي في هذه العلاقة، ويعطيان قيمتين للاستطاعة، وستكون القيمة الأخيرة هي الأكبر.

استطاعة المحور (Shp)

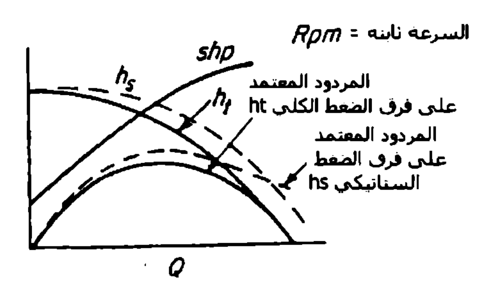
تقاس استطاعة محور دخل أو قيادة المروحة بواسطة مقياس ديناموميتر مناسب، ويُحدَّد مردود المروحة بالعلاقة:

$$\text{Fan eff, \%} = \frac{\text{air hp}}{\text{shp}} \times 100$$

وتتبع هذه القيمة فرق الضغط المستخدم هل هو ستاتيكي أم كلي.

الصفات المميزة للمروحة

تعمل المروحة - مثل باقي الآلات المسرِّعة للموائع - وفق منحنيات مميزة، ويبين الشكل التالي (8.8) مجموعة من المنحنيات المميزة لمروحة نموذجية. وتكون هذه المنحنيات محددة بدقة لكل مروحة ويجب أن تعمل المروحة وفق إحدى نقاط هذه المنحنيات المميزة.



الشكل 8.8

قوانين المروحة

انظر الفصل السابع الحاوي لهذه القوانين.

مميزات الأداء للآلات المكبسية

الضغط الفعّال الوسطي

إن من المناسب عند قياس أداء الآلات الحاوية على اسطوانات ومكابس استخدام الضغط الفعّال الوسطي، ويعرَّف الضغط الفعال الوسطي - كما هو مبين بالشكل 8.9 - على أنه الفرق في الضغط على جانبي المكبس، حيث يؤدي هذا الفرق إلى تحريك المكبس في المحركات، أو يقاوم حركة المكبس في المضخات، والذي يمكن تحديده كما يلي:

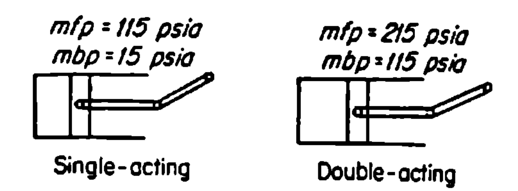
الضغط الفعّال الوسطي (mep) = الضغط الوسطي أمام المكبس (mfp) ـــ الضغط الوسطي خلف المكبس (mbp).

لـــذلك فإنه ومن أجل المكبس أحادي الفعل أو ثنائي الفعل المبينان في الشكل 8.9 فـــإن الضـــغط الفعال الوسطي هو نفسه في الحالتين (100 psi) وذلك لأنه يمكننا حسابه في المكبس الأول كما يلي:

$$mep = 115 - 15 = 100 \text{ psi}$$

ومن أجل المكبس الثاني:

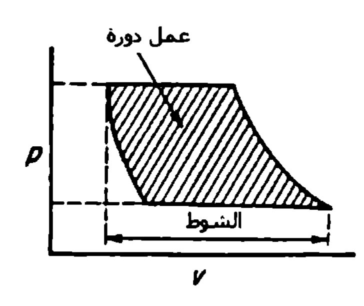
$$mep = 215 - 115 = 100 \text{ psi (kPa)}$$



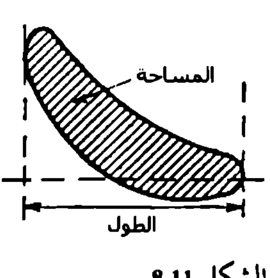
الشكل 8.9

تعتبر قيم هذه الضغوط وسطية وأنها ثابتة على كامل الشوط، ويمكن حسابها تحت شروط دورية نظرية عبر استخدام طرق الترموديناميك وميكانيك الموائع. وهكذا فإن مساحة المخطط P-V المبينة في الشكل 8.10 تمثل العمل اللازم لدورة واحدة، ويعبّـــر عنه بالقدم – باوند. إذا تمّ تقسيم تلك المساحة على كامل طول المخطط، والتي تعني وفق الشوط أو الإزاحة فإننا سنحصل على ارتفاع شاقولي للمستطيلات الممـــثلة لتلك المساحات، يمثل هذا الارتفاع الضغط الفعّال الوسطي (mep) كما يلي:

$$\text{mep} = \frac{\text{عمل دورة}, \text{ft.lb}}{\text{الإزاحة}, \text{ft}^3 \times 144\text{in}^2/\text{ft}^2} = \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$



الشكل 8.10



الشكل 8.11

ويُحـــدَّد الضغط الفعّال الوسطي الحقيقي من المساحات البلانيمترية لبطاقة المؤشر مقسومة على الطول ومضروبة بمقياس النابض، ولذلك يمكننا كتابة المعادلة التالية ووفق الشكل 8.11:

$$\text{mep} = \frac{\text{area, in}^2}{\text{length in}} \times \text{spring scale, lb/(in}^2\text{.in)}$$

الاستطاعة الظاهرية

يستخدم الضغط الفعّال الوسطي لحساب الاستطاعة الظاهرية كما يلي:

$$\text{Indicated hp} = \text{mep}\frac{\text{Lan}}{33{,}000}$$

ونحصـــل على المتغيرين a وL مباشرة من قطر الاسطوانة وطول الشوط. وتعتمد عـــدد الـــدورات الكاملة في الدقيقة على تركيب أو تصميم آلية الحركة. ونعني بـــذلك، أحادي أو ثنائي الفعل، عدد الاسطوانات، وعدد الأشواط أو الدورات اللازمة لإكمال دورة ترموديناميكية كاملة.

استطاعة المحور أو الكبح

تعطـــى اســـتطاعة المحور أو الكبح والمقاسة بالديناموتر أو بمكبح Prony بالعلاقة التالية:

$$hp = \frac{2\pi LFN}{33{,}000}$$
$$= \frac{LFN}{5250}$$

ضغط الكبح الفعّال الوسطي أو ضغط الكبح الوسطي

إن مــــن غير الممكن أخذ معلومات من البطاقات الاسمية للمحركات أو الضواغط ذات السرعة العالية، ولكن تؤخذ قراءة استطاعة الكبح (brake horsepower (bhp)) والـــتي يعبّر عنها بضغط الكبح الوسطي المكافئ، بالموافقة والمساواة بين المعادلتين السابقتين أو:

$$\text{Brake mean pressure, psi (kPa)} = \frac{bhp}{Lan} \times 33{,}000$$

ضغوط الاحتكاك الوسطية

يقيس ضغط الاحتكاك الوسطي الضياعات بين الاسطوانات والمحاور:

ففـــي المحركات: ضغط الاحتكاك الوسطي، psi (kPa) = الضغط الفعّال الوسطي المؤشر - ضغط الكبح الوسطي.

وفي الضواغط أو المضخات:

ضغط الاحتكاك الوسطي، psi (kPa) = ضغط الكبح الوسطي - الضغط الوسطي المؤشر.

المردود الميكانيكي

يعتبر المردود الميكانيكي طريقة أخرى للتعبير عن الضياعات بين الاسطوانة والمحور:

ففي المحركات:

$$\text{Mechanical eff} = \frac{\text{bhp}}{\text{indicated hp}} \times 100$$

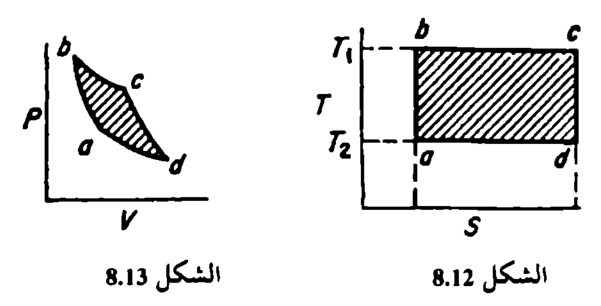
وفي الضواغط أو المضخات:

$$\text{Mechanical eff} = \frac{\text{indicated hp}}{\text{bhp}} \times 100$$

الدارات الحرارية للمحرك ـ النظرية

دارة كارنو (Carnot)

يعطى المردود الحراري الأعظمي لتحويل الحرارة إلى عمل من قبل دارة كارنو (الشكل 8.12)، ويكون هذ المردود مستقلاً عن خواص الوسيط العامل ويحدد كما يلي:



الشكل 8.13 الشكل 8.12

$$\text{المردود الحراري} = \frac{\text{العمل المنجز}}{\text{الحرارة المضافة}}$$

$$= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

يعتمد الضغط الفعّال الوسطي لدارة كارنو على خواص الوسيط العامل، ومن أجل غاز معين (الشكل 8.13) لدينا:

$$\text{Thermal eff} = 1 - \left(\frac{1}{R_v}\right)^{k-1}$$

ويظهـــر الشكل 8.14 نتائج تطبيق هذه المعادلة على دارة كارنو، باستخدام الهواء كوسيط عمل (k=1.4). ويعطى عمل الدارة بالعلاقة التالية حيث تملك الرموز نفس مدلولها في الشكل 8.13:

$$\Delta W_{cycle} = (T_2 - T_1)\frac{WR}{J}\ln\frac{v_c}{v_b}$$

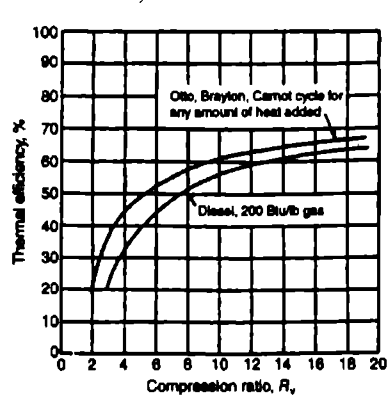
و

$$\text{mep} = \frac{(T_2 - T_1)WR\ln(v_c / v_b)}{v_d - v_b}$$

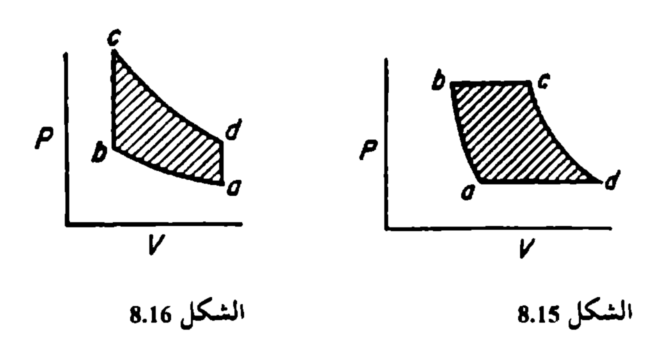
ومن أجل البخار الرطب مثل بخار الماء (الشكل 8.15):

$$\text{mep} = \frac{W_{cycle}}{v_d - v_b}$$

W_{cycle} = area abcd



الشكل 8.14



الشكل 8.16 الشكل 8.15

دارة اوتو (Otto)

تعتبر هذه الدارة هي الدارة الأساسية المستخدمة في المحركات البترينية أو محركات المزج الأخرى (الشكل 8.16) ويعطى المردود الحراري بالعلاقة:

$$\text{Thermal eff} = 1 - \left(\frac{1}{R_v}\right)^{k-1}$$

ولقد تم إظهار القيم بيانياً من أجل الهواء في الشكل 8.15.

$$\text{Work, ft.lb} = JQ_{added} \times \text{thermal eff}$$

$$\text{mep, psi} = \frac{\text{work}}{144(v_a - v_b)}$$

حيث وضعت الأدلة بما يتوافق مع الشكل 8.16.

دارة ديزل Diesel

تعتبر هذه الدارة هي الدارة الأساسية لمحركات الاحتراق الداخلي ذات الحقن (الشكل 8.17)، ويعطى المردود الحراري لها كما يلي:

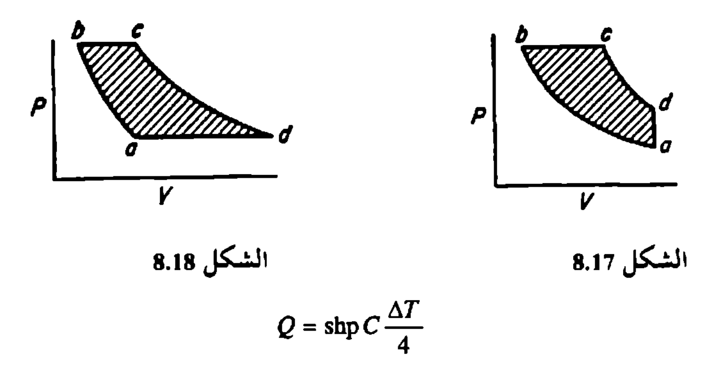
$$\text{Thermal eff} = 1 - \frac{1}{(v_a / v_b)^{k-1}} \frac{(v_c / v_d)^k - 1}{K(v_c / v_d - 1)}$$

ويبين الشكل 8.15 هذه القيم من أجل هواء نظامي.

$$\text{Work} = J[WC_p (T_c - T_b) - WC_v(T_d - T_a)]$$

$$\text{mep} = \frac{\text{work}}{v_a - v_b}$$

كما يمكن تقدير الحرارة التي يمكن استردادها من غازات العادم بالعلاقة التالية:



الشكل 8.17 الشكل 8.18

$$Q = \text{shp}\, C \frac{\Delta T}{4}$$

دارة برايتون (Brayton)

تستخدم هذه الدارة للتعبير عن منشآت طاقة العنفات الغازية (الشكل 8.18)، ويعطى المردود الحراري لها بالعلاقة:

$$\text{Thermal eff} = 1 - \left(\frac{1}{R_v}\right)^{k-1}$$

وتؤخذ المعطيات بيانياً من الشكل 8.15 ومن أجل الهواء النظامي. حيث يعطى العمل والضغط الفعّال المتوسط بالعلاقتين:

$$Work = WC_pJ(T_c - T_b - T_d + T_a)$$

$$mep = \frac{work}{v_d - v_b}$$

دارة رانكين (Rankine)

يـــتم إيجـــاد قيم الدارة النظرية الحاوية على البخار مثل بخار الماء، فقط من أجل خواص فيزيائية حقيقية للمائع، كتلك المعطاة في جداول بخار الماء ومخططات موليير (Mollier)، ويحســـب العمل المحرك الأساسي ΔW_{pm} لمعادلة القدرة العامة كما هو مبين بالشكلين 8.19 و8.20 والذي يساوي:

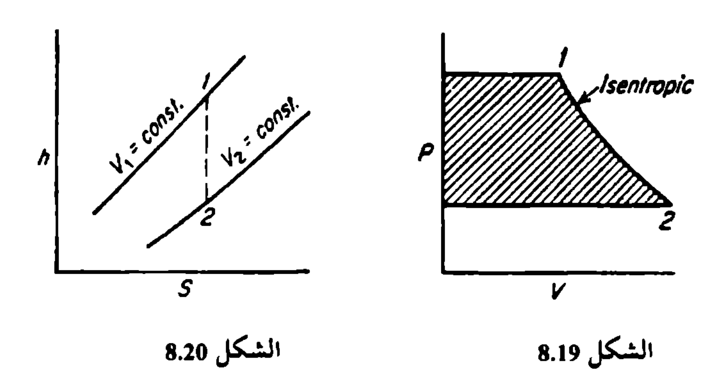
$$\Delta W_{pm} = h_1 - h_2 \qquad Btu/lb\ (kJ/kg)$$

حيث

h_1 = انثالبي الصمام الخانق، Btu/lb.

h_2 = انثالبي غازات العادم (عند نفس الانتروبي للقيمة h_1)، Btu/lb.

ويعطى معدّل الماء أو معدّل بخار الماء بالعلاقة:



الشكل 8.20 الشكل 8.19

$$\text{Water rate} = \frac{3412.75}{\Delta W_{pm}} \quad \text{lb/kWh}$$

$$= \frac{344.1}{\Delta W_{pm}}$$

حيث يمثل ΔW_{fp} عمل مضخة التزويد المطلوب لإيصال الماء إلى المرجل (الشكل 8.21) ويعطى بالعلاقة:

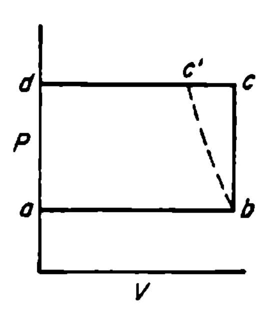
$$\Delta W_{fp} = h_{c'} - h_b \quad \text{Btu/lb (kJ/kg)}$$

حيث

h_b = انثالبي السائل الداخل إلى المضخة، Btu/lb (kJ/kg).

$h_{c'}$ = انثالبي السائل الخارج من المضخة (وله نفس الانتروبي للقيمة h_b)، Btu/lb (kJ/kg).

إذا كان الماء غير قابل للانضغاط عندها ستنطبق النقطة c' على النقطة c في الشكل 8.21 ويكون لدينا:



الشكل 8.21

$$\text{Btu/lb} = \frac{\Delta p \times 144 \times \bar{v}}{778} = \frac{\text{head on pump}}{778}$$

عمل الدارة الصافي Btu/lb (kJ/kg) $\Delta W_{net} = \Delta W_{pm} - \Delta W_{fp}$

كمية الحرارة المضافة لإنتاج بخار الماء ΔQ_{added} =

$= h_1 - h_{2_{liq}} - \Delta W_{fp}$ (Btu/lb) (kJ/kg)

حيث

$h_{2_{liq}}$ - انثالبي السائل المشبع عند مخرج الناقل الأساسي.

المردود الحراري لدارة رانكين $= \dfrac{\Delta W_{net}}{\Delta Q_{added}}$

$$= \frac{h_1 - h_2 - \Delta W_{fp}}{h_1 - h_{2_{liq}} - \Delta W_{fp}}$$

ستصبح ΔW_{fp} دارات الضغط المنخفض صغيرة ويمكن إهمالها وبالتالي سنحصل على ما يلي:

المردود الحراري لدارة رانكين $\cong \dfrac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2_{liq}}}$

معدّل كمية الحرارة المزودة لدارة رانكين $\text{Btu/kWh supplied} = \dfrac{3412.75}{\text{thermal eff}}$

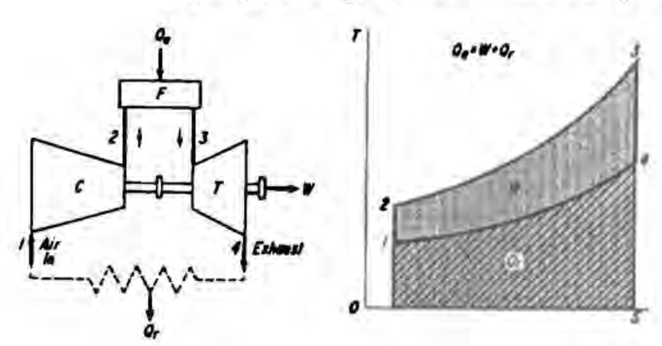
المسعر الخانق (THROTTLING CALORIMETER)

يعمل المسعر الخانق والمستخدم لقياس انثالبي البخار الرطب وفق أساس توسع متساوي الانثالبي من شروط خط الضغط العالي إلى الضغط ضمن غرفة المسعر. ولإيجاد الحلول البيانية عليك استخدام مخطط موليير (Mollier) والموجود في معظم مراجع الهندسة الميكانيكية، حيث يكون فيها:

$$h_{\text{calorimeter chamber}} = h_{\text{high-pressure line}}$$

العنفات الغازية

يبين الشكل 8.22 و8.23 مخططاً لعنفة غازية بسيطة ذات دارة مفتوحة والمخطط T - S لهـا، كما يعطي الشكل معادلات العمل للضاغط، غرفة الاحتراق، والعنفة، كما يبين الشكل أيضاً المخططات P - V لكل عنصر من الدارة.



الشكل 8.22

وكـــل الاختصارات والرموز المستخدمة في الشكل 8.23 معطاة في الجدول 8.2. وسنورد الآن مختلف المعادلات الممثلة لعنفة غازية بسيطة ذات دارة مفتوحة:

$$T_2 = T_1 P_r^{(k-1)/k}$$

$$W_c = c_p(T_2 - T_1)$$

$$Q_a = c_p(T_3 - T_2)$$

$$T_4 = \frac{T_3}{P_r^{(k-1)/k}}$$

$$W_t = c_p(T_3 - T_4)$$

$$\text{hermaleff} = \frac{W}{Q_a} = \frac{W_t - W_c}{Q_a}$$

$$\text{Thermaleff} = 1 - \frac{1}{P_r^{(k-1)/k}}$$

$$\text{TEnergy in exhaust} = c_p(T_4 - T_1) \quad \text{Btu/lb air}$$

$$Q_r = Q_a - W$$

$$P_3 = P_1 P_r$$

COMPRESSOR

(1) $\frac{P_1V_1}{J} + E_1 + W_c = \frac{P_2V_2}{J} + E_2$

(2) $H_1 + W_c = H_2$

(3) $W_c = H_2 - H_1$

(4) $W_c = c_p(T_2 - T_1)$

COMBUSTOR

(5) $\frac{P_2V_2}{J} + E_2 + Q_a = \frac{P_3V_3}{J} + E_3$

(6) $H_2 + Q_a = H_3$

(7) $Q_a = H_3 - H_2$

(8) $Q_a = c_p(T_3 - T_2)$

TURBINE

(9) $\frac{P_3V_3}{J} + E_3 = \frac{P_4V_4}{J} + E_4 + W_c + W$

(10) $H_3 = H_4 + W_c + W$

(11) $W = H_3 - H_4 - W_c$

(12) $W = H_3 - H_4 - H_2 + H_1 = c_p(T_3 - T_4 - T_2 + T_1)$

HEAT REJECTED

(13) $\frac{P_4V_4}{J} + E_4 = \frac{P_1V_1}{J} + E_1 + Q_r$

(14) $H_4 = H_1 + Q_r$

(15) $Q_r = H_4 - H_1$

(16) $Q_r = c_p(T_4 - T_1)$

CYCLE

(17) $Q_a = W + Q_r$

(18) $W = Q_a - Q_r = H_3 - H_2 - (H_4 - H_1)$

(19) $W = c_p(T_3 - T_4 - T_2 + T_1)$

ENERGY FLOW

(20) Thermal efficiency $= \frac{W}{Q_a}$

(21) $= \frac{c_p(T_3 - T_4 - T_2 + T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$

(22) $= 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$

COMPRESSOR WORK

$W_c = \frac{P_2V_2}{J} - \frac{P_1V_1}{J} + E_2 - E_1$

TURBINE WORK

$W_T = \frac{P_3V_3}{J} - \frac{P_4V_4}{J} + E_3 - E_4$

WORK OUTPUT

$W = W_T - W_c$

الشكل 8.23

الجدول 8.2 الاختصارات والرموز المستخدمة في الشكل 8.23

a – التسارع، ft/s^2.

A – المساحة، ft^2.

bdc – المركز الميت السفلي.

bhphr – استطاعة الكبح – ساعة.

bmep – ضغط الكبح الفعّال الوسطي.

bsfc – استهلاك الوقود النوعي الكابح.

Btu – وحدة حرارية بريطانية.

c – خلوص الضاغط المئوي.

C – الحرارة النوعية، Btu/lb.

C_a – الحرارة النوعية البوليتروبية، Btu/lb.

C_b – الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت، Btu/lb.

C_v – الحرارة النوعية تحت حجم ثابت، Btu/lb.

C – ذرة الكربون.

C_d – معامل فوهة التصريف.

C_v – معامل سرعة الفوهة.

CO – رمز أول أكسيد الكربون.

CO_2 – رمز ثاني أكسيد الكربون.

COP – معامل الأداء.

d – بعد، ft.

D – كثافة الغاز، lb/ft^3.

e – المردود الحراري للدارة.

e_b – مردود المرجل، (مولّد البخار).

e_c – مردود الضاغط.

e_e – مردود المحرك.

e_n – مردود الفوهة.

e_r – فعالية المبادل.

e_s – مردود المرحلة.

e_t – المردود الحراري.

e_v – المردود الحجمي للضاغط.

e_D – مردود الرذاذات.

e_N – مردود الفوهة.

E – الطاقة الداخلية، Btu/lb.

E_k – الطاقة الحركية، Btu أو ft.lb/lb.

E_p – الطاقة الكامنة، ft.lb/lb.

F – القوة، lb (= ma).

F – درجة الحرارة، بالدرجات فهرنهايت.

g – تسارع الجاذبية الأرضية – 32.2 ft/s^2.

h_f - انثالبي السائل، Btu/lb.

h_{fg} - انثالبي التبخر، Btu/lb.

h_v - انثالبي البخار، Btu/lb.

h-p - الضغط العالي.

H - الانثالبي، Btu أو ft.lb/lb.

H - ذرة الهيدروجين.

H_s - انثالبي الركود، Btu/lb.

$H_1 + E_{k1}$ -

H_2O - الرمز الكيميائي للماء أو لبخار الماء.

HHV - قيمة كمية الحرارة العليا، Btu/lb.

HR - معدل كمية الحرارة، Btu/Kwhr.

Ihp - الاستطاعة الظاهرية.

J - 778.26 ft.lb/Btu.

in. Hg abs - إنش زئبق مطلق.

k - نسبة الحرارة النوعية = $\frac{C_p}{C_v}$.

KE - الطاقة الحركية، ft.lb أو Btu/lb.

kwhr - كيلو واط ساعي = 3412.75 Btu.

$\log_e$ - اللوغاريتم ذو الأساس e.

l-p - ضغط منخفض.

L – طول شوط المكبس، ft.

m – الكتلة – W/g.

m – تدفق نزف الهواء، ليبرة لكل ليبرة تدفق بخار ماء من الفوهة.

M – المادة.

M – رقم ماخ.

M – الوزن المولي.

n – ثابت العملية البوليتروبية.

N – عدد العناصر الكلي.

O – رمز الأوكسجين.

psf – ضغط lb/ft^2.

psfa – مطلق lb/ft^2.

psfg – مقاس lb/ft^2.

psi – lb/in^2.

psia – مطلق lb/in^2.

psig – مقاس lb/in^2.

P – الضغط psi, psf, psia, psig, psfa, psfg

P_c – ضغط الفوهة الحرج، psia, psfa.

P_m – الضغط الفعّال الوسطي، psi, psf.

P_s – ضغط الركود، spia psfa.

P_r = نسبة الضغط.

P_r = الضغط المخفّض.

Q = كمية الحرارة المنقولة، Btu/lb.

Q_c = كمية الحرارة المضافة للدارة، Btu/lb.

Q_r = كمية الحرارة المطروحة من الدارة، Btu/lb.

R = ثابت الغاز.

R = درجة الحرارة المطلقة، درجة رانكين Rankine.

R_u = ثابت الغازات العام = 1545.

RF = عامل إعادة التسخين.

$\overline{RH}$ = الرطوبة النسبية، بالمئة.

s = مسافة أو طول، ft.

s_f = انتروبي السائل، Btu/lb.°F.

s_{fc} = زيادة الانتروبي عند التحول من سائل مشبع إلى بخار Btu/lb.°F.

s_v = انتروبي البخار، Btu/lb.°F.

S = الانتروبي، Btu/lb.°F.

S = ذرة الكبريت.

$\overline{SH}$ = الرطوبة النوعية، ليبرة بخار لكل ليبرة غاز جاف.

SR = تدفق بخار الماء lb/Kwhr.

t = درجة الحرارة، °F.

t = الزمن، s.

tdc = المركز الميت السفلي.

T = درجة الحرارة المطلقة، °R.

T_c = درجة الحرارة الحرجة للفوهة، °R.

T_s = درجة حرارة الركود، °R.

T_r = درجة حرارة المستقبل، °F.

T_r = درجة الحرارة المخفضة.

T_s = درجة حرارة المنبع.

$\overline{TH}$ = كمية الحرارة الكلية (Btu) لكل ليبرة من المزيج.

u = السرعة، fps (ft/s).

v = السرعة، fps (ft/s).

v_f = الحجم النوعي للسائل المشبع، ft^3/lb.

v_{fs} = زيادة الحجم النوعي لانتقال السائل المشبع إلى بخار، ft^3/lb.

v_s = الحجم النوعي للبخار، ft^3/lb.

V = الحجم النوعي، ft^3/lb.

V_c = حجم الخلوص، ft^3.

V_d = الحجم المزاح، ft^3.

V_M = حجم المول، ft^3.

V_r = نسبة الانضغاط، $\frac{V_1}{V_2}$.

V_r = الحجم المخفض.

v_t = الحجم الكلي، ft^3.

w = وزن الكتلة، lb.

W = العمل الميكانيكي ft.lb أو Btu/lb.

W_e = خرج العمل المحرك، Btu أو ft.lb/lb.

W_f = عمل التدفق، ft.lb أو Btu/lb.

W_H = العمل في اسطونات الضغط العالي، ft.lb أو Btu/lb.

W_L = العمل في اسطونات الضغط المنخفض، ft.lb أو Btu/lb.

W_o = ليبرة أوكسجين لكل ليبرة وقود.

W_p = العمل الداخلي للمضخة، Btu أو ft.lb/lb.

z = النسبة المئوية للجودة.

y = النسبة المئوية للرطوبة.

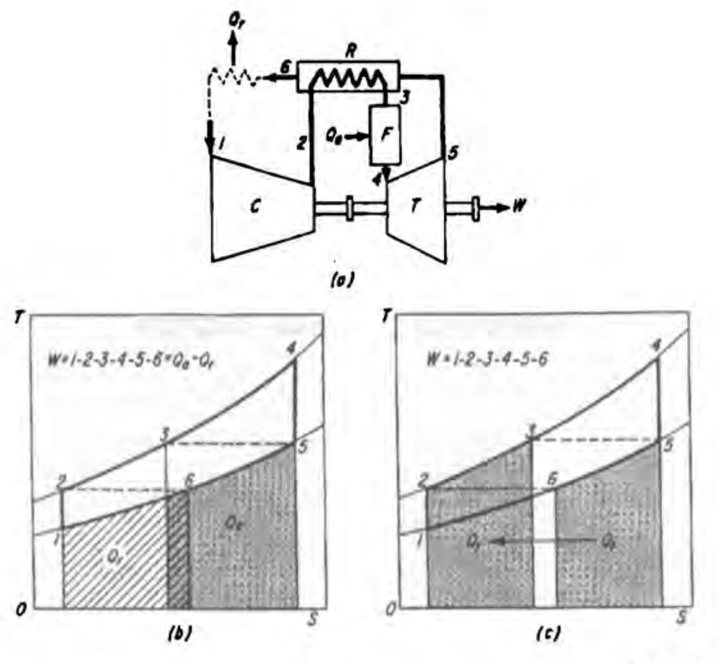
Z = عامل قابلية الانضغاط.

يظهر الشكل 8.25 دارة عنفة غازية مع استرجاع حراري، وتعطى معادلات الأداء لهذا النوع من العنفات كما يلي:

$$Q_t = c_p (T_5 - T_6) = c_p (T_3 - T_2) \text{ Btu/lb air}$$

$$Q_a = c_p (T_4 - T_3)$$

$$W_t = c_p (T_4 - T_5)$$



الشكل 8.25

$$e_t = \frac{W}{Q_a} = \frac{W_t - W_c}{Q_a}$$

$$e_t = 1 - \frac{T_1}{T_4} P_r^{(k-1)/k}$$

$$Q_r = Q_a - W$$

$$P_4 = P_1 P_r$$

9

معادلات هندسة الطاقة

عوامل أداء منشآت الطاقة

يُعرف معدَّل كمية الحرارة للأداء الحراري الكلي كما يلي:

$$\text{معدّل كمية الحرارة Btu/kWh} = \frac{\text{كمية الحرارة المخزنة بالوقود خلال مدة، Btu}}{\text{الطاقة المستخرجة خلال نفس الفترة، kWh}}$$

$$(Btu/kWh \times 2.33 = kJ/kWh)$$

$$\text{المردود الحراري، \%} = \frac{3412.75}{\text{كمية الحرارة}} \times 100$$

$$\text{عامل الاستطاعة، \%} = \frac{\text{متوسط الحمل خلال فترة، kW}}{\text{الاستطاعة المحددة، kW}} \times 100$$

$$\text{عامل التحميل، \%} = \frac{\text{متوسط الحمل خلال فترة، kW}}{\text{حمولة الذروة خلال نفس الفترة، kW}} \times 100$$

أداء مولد البخار (المرجل)

رموز واصطلاحات

h_{steam} = انثالبي الوحدة الخارجة من مولّد البخار (خرج المحمّص)، Btu/lb (kJ/Kg).

$h_{feedwater}$ = انثالبي ماء التزويد الداخل لمولّد البخار (دخل الموفّر)، Btu/lb (kJ/Kg).

W_m = نسبة الرطوبة في الوقود، lb/lb (Kg/Kg).

t_{fuel} = درجة حرارة الوقود، °F (°C).

t_{fg} = درجة حرارة غاز المدخنة، °F (°C).

H_2 – ليبرة هيدروجين في كل ليبرة وقود، يؤخذ من التحاليل المجراة على الوقود (Kg/Kg).

W_{da} – وزن هواء التزويد الجاف، lb/lb fuel (Kg/Kg).

W_w – وزن بخار الماء لكل ليبرة هواء جاف (Kg/Kg).

t_a – درجة حرارة المحيط، أو درجة حرارة الهواء الداخل إلى مسخّن الهواء، °F (°C).

W_{dg} – وزن غازات الوقود الجافة، lb/lb fuel (Kg/Kg).

C – ليبرة كربون في كل ليبرة وقود، ويؤخذ من التحاليل المجراة على الغاز (Kg/Kg).

CO – نسبة غاز CO في غازات العادم، يؤخذ كنسبة مئوية وعلى أساس الحجم الجاف.

CO_2 – نسبة غاز CO_2 في غازات العادم، يؤخذ كنسبة مئوية وعلى أساس الحجم الجاف.

refuse – ليبرة نفايات (مخلفات) لكل ليبرة وقود، وهي المحترقة في فرن مولّد البخار (Kg/Kg).

ash – ليبرة رماد لكل ليبرة وقود، وتؤخذ من التحاليل المجراة على الوقود (Kg/Kg)

كمية الحرارة المضافة إلى بخار الماء

$$\Delta Q = h_{steam} - h_{feedwater} \qquad \text{Btu/lb (kJ/kg)}$$

وإذا كان لدينا محمصاً للبخار فعندها يجب أن نضيف كمية الحرارة المضافة للتحميص إلى كمية الحرارة المضافة وهي:

$$h_{reheat} = h_{leaving\ recheater} - h_{entering\ reheater}$$

قدرة مولد البخار وكمية البخار الناتج

يستخدم مصطلح استطاعة المولّد المطوّرة (developed boiler horsepower) – في نماذج مولّدات البخار الصغيرة – لقياس خرج مولّد البخار، أو كمية الحرارة المضافة إلى بخار الماء. والتي تعرَّف على أنها كمية الحرارة اللازمة لتبخير 34.5 ليبرة (15.7 Kg) من الماء اعتباراً من الدرجة 212 °F (100 °C).

لذلك:

استطاعة المولد المطوّرة = 34.5 × 970.4 = 33,479 Btu/h (9.8 KW)

وتعرّف استطاعة المولّد المقدرة كما يلي:

استطاعة المولد المقدرة = 10 ft² (0.920 m²) سطح تسخين

بالتالي

$$\text{النسبة المئوية المقدرة} = \frac{\text{استطاعة المولد المطورة}}{\text{استطاعة المولد المقدرة}} \times 100$$

عامل التبخير (FE)

$$FE = \frac{\text{كمية الحرارة الفعلية الممتصة لتحويل الماء إلى بخار}}{\text{كمية الحرارة الكامنة للبخار اعتباراً من الدرجة } 212°F\ (100°C)}$$

$$= (h_{steam} - h_{feedwate})/970.4\ (2262\ kJ/kg)$$

التبخير

التبخير الفعلي AE، ليبرة بخار ماء لكل ليبرة وقود (Kg/Kg)

$$= \frac{\text{كمية البخار المولدة } lb(kg) \text{ خلال فترة}}{\text{كمية الوقود المحروقة } lb(kg) \text{ خلال نفس الفترة}}$$

التبخير المكافئ EE، ليبرة بخار ماء لكل ليبرة وقود (Kg/Kg) اعتباراً من الدرجة 212 °F (100 °C).

= البخير الفعلي AE × عامل التبخير الفعلي FE

= FE × AE

مردود مولد البخار

مردود موّلد البخار = كمية الحرارة المضافة إلى بخار الماء خلال فترة، Btu(kJ) / كمية الحرارة الموجودة في الوقود خلال نفس الفترة، Btu(KJ)

تعرّف كمية الحرارة الموجودة في الوقود على أنها أعلى قيمة لكمية الحرارة البدائية المخزنة في الوقود وفق أساسيات الاحتراق.

الضياعات وتوازن كمية الحرارة

إن من الممكن وعبر تطبيق القانون الأول في الترموديناميك إيجاد جميع كميات الحرارة الموجودة ضمن الوقود عبر إضافة جميع الضياعات إلى كمية الحرارة المضافة لبخار الماء.

الضياعات الناتجة عن وجود الرطوبة في الوقود

$$= W_m (1090.7 - t_{fuel} + 0.455\ t_{fg}) \quad \text{Btu/fuel}$$

حيث

$$\text{Btu/lb} \times 2.33 = \text{kJ/Kg}$$

الضياعات الناتجة عن احتراق الهيدروجين إلى بخار ماء بدلاً من سائل.

$$= 9 \times H_2 (1090.7 - t_{fuel} + 0.455\ t_{fg}) \quad \text{Btu/lb fuel}$$

حيث

H_2 = ليبرة هيدروجين لكل ليبرة وقود، وتؤخذ من التحاليل المجراة على الوقوج (Kg/Kg).

الضياعات الناتجة عن الرطوبة في الهواء.

$$= W_{as} \times W_w \times 0.47 (t_{fg} - t_a) \quad \text{Btu/lb fuel}$$

الضياعات الناتجة عن غازات العادم الجافة = $0.24\ W_{dg} (t_{fg} - t_a)$

مولدات البخار

يتم حساب مردود مولّد البخار باستخدام المعادلات التالية (انظر الشكل 9.1):

$$\text{المردود الكلي لمولد البخار} = \frac{\text{الخرج، Btu/h}}{\text{الدخل، Btu/h}}$$

الخرج، $\text{Btu/h} = S(h_g - h_{f1}) + S_r (h_{g3}/h_{g2}) + B (h_{f3}-h_{f1})$

حيث

S = تدفق بخار الماء، lb/h.

S_r = تدفق بخار الماء المحمّص، (في حال وجوده) lb/h.

B = التصريف، lb/h.

الدخل ، $\text{Btu/h} = FH$

حيث

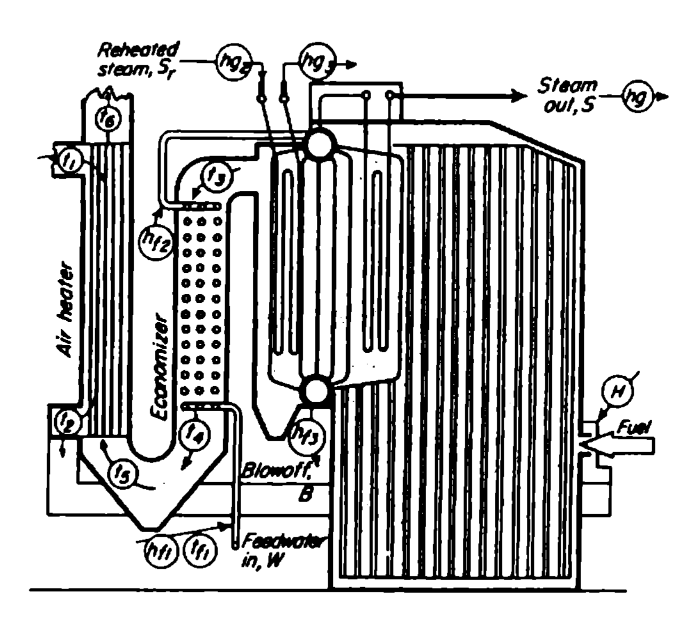
F = الوقود الداخل، lb/h (المحترق).

H = قيمة كمية الحرارة العظمى للوقود Btu/lb المحترق.

h_f = انثالبي ماء التزويد، Btu/lb.

h_s = انثالبي بخار الماء المغادر لمولّد البخار، Btu/lb.

$$\text{مردود الموفر} = \frac{\text{كمية الحرارة الممتصة، Btu/h}}{\text{كمية الحرارة المقدمة، Btu/h}}$$



الشكل 9.1 نقاط قياس درجات الحرارة والانثالبي المستخدمة في قياس مردود مولّد البخار

كمية الحرارة الممتصة, $Btu/h = W (h_{f2} - h_{f1})$

حيث

W = تدفق ماء التزويد، lb/h.

كمية الحرارة المقدمة, $Btu/h = H_g F$

حيث

H_g = كمية الحرارة المتوفرة في غاز الوقود، وقود Btu/lb.

= كمية الحرارة المتوفرة في الغاز الجاف + كمية الحرارة المتوفرة في بخار غازات العادم، وقود Btu/lb.

$$= (t_3 - t_{f1})0.24G + (t_3 - t_{f1})0.46\left\{M_f + 8.9H_2 + M_a\left[G - C_b - N_2 - 7.94\left(H_2 - \frac{O_2}{8}\right)\right]\right\}$$

$$G = \frac{11CO_2 + 8O_2 + 7(N_2 + CO)}{3(CO_2 + CO)} \times \left(C_b + \frac{S}{2.67}\right) + \frac{S}{1.60}$$

حيث

M_f = ليبرة رطوبة لكل ليبرة وقود محترقة.

M_a = ليبرة رطوبة لكل ليبرة هواء جواف داخل لفرن المولّد.

C_b = ليبرة كربون لكل ليبرة وقود محترقة = $C - R_{cr}$.

C_r = ليبرة قابلة للاحتراق لكل ليبرة مخلفات (نفايات).

وسنعطي الآن عوامل التحويل للمعادلات السابقة:

W = Btu/h × 0. 293

Kg/h = lb/h × 0.454

Btu/lb × 2.33 = kJ/Kg

lb/lb = Kg/Kg

ويبين الشكل 9.1 السابق النقاط الواجب أخذ درجات حرارتها والانثالبي لها واللازمة لحساب مردود مولّد البخار.

$$\text{مردود مسخن الهواء} = \frac{\text{Btu/lb fuel كمية الحرارة الممتصة}}{\text{Btu/lb fuel، كمية الحرارة المتوفرة (المقدمة)}}$$

كمية الحرارة الممتصة, Btu/lb fuel = $A_h (t_2 - t_1) (0.24 + 0.46 M_a)$

حيث

A_h = تدفق الهواء خلال المسخن، وقود lb/lb = $A - A_m$.

A = التدفق الكلي للهواء الداخل لفرن المولّد، وقود lb/lb.

$$= G - C_b - N_2 - 7.94\left(H_2 - \frac{Q_2}{8}\right)$$

G = وهو جهاز مشابه للموفر ولكنه يوضع على مخرج الغازات الخارجة من الفرن.

A_m = الهواء الخارجي الذي يتم تزويده عبر المروحة أو بمصادر أخرى، وقود lb/lb.

كمية الحرارة المقدمة, Btu/lb fuel = $(t_5 - t_1)\, 0.24G + (t_5 - t_1)\, 0.46\, (M_f + 8.94\, H_2 + M_a\, A)$

حيث G كما عرفناه في الموفر أعلاه، و A كما عرفناها سابقاً، ويعتمد كلاهما على خصائص الغاز الداخل إلى مسخّن الهواء.

أنواع الوقود والاحتراق

مقدار تسخين الوقود

يمكن إيجاد مقدار تسخين أنواع الوقود الصلبة مثل الفحم الحجري، فحم الكوك، الثقل (لباب قصب السكر) بالعلاقة:

$$Q = 14,500C + 62,000\left(h - \frac{O}{8}\right) + 4000S$$

حيث

Q - مقدار التسخين، Btu/lb (محترقة).

C - نسبة الكربون (طيّار وثابت، ويدعى أيضاً بالكربون الكلي) في الوقود، ويعبر عنه كنسبة.

H - نسبة الهيدروجين.

O - نسبة الأوكسجين.

S - نسبة الكبريت في الوقود.

يعبر عن النسب الثلاث السابقة بنسب مئوية، وللتحويل إلى الكيلو جول اضرب قيم Btu بالعدد 1.055.

ويعطى مقدار التسخين للوقود السائل - النفط - بالعلاقة:

$$Q = 13,500C + 60,890H \quad Btu$$

حيث تأخذ الرموز نفس دلالاتها السابقة.

عندما تُعرَّف قراءة Baume' للوقود السائل. فعندها يُحسب مقدار التسخين وفق العلاقة:

$$Q = 18,650 + 40\,(\text{Baumé reading} - 10)$$

كمية الهواء المطلوبة: تعطى كمية الهواء المطلوبة لمختلف أنواع الوقود ــ الصلب والسائل والغازي - بالعلاقة:

$$\text{كمية الهواء المطلوبة} \quad ,\text{lb/lb fuel} = \frac{\text{مقدار التسخين الأعظمي للوقود}, \text{Btu/lb}}{1300}$$

$$(\text{lb/lb} \times 0.454 = \text{kg/kg})$$

نواتج الاحتراق

تجرى عمليات تحليل لغازات المدخنة لتحديد فعالية عمليات الاحتراق، والتي تكون معطاة سلفاً على أساس حجمي جاف.

إذا كان محتوى الوقود من النتروجين قليلاً عندها يحسب الهواء الإضافي الواجب زيادته بالعلاقة:

$$\text{الهواء الزائد المضاف} = \frac{3.78(O_2 - CO/2)}{N_2 - 3.78(O_2 - CO/2) \times 100} \quad \text{percent}$$

حيث تدل الصيغ O_2، N_2، CO على النسب المئوية لحجوم هذه الغازات، وتأخذ من تحليل غازات المدخنة، وهناك كميات هواء إضافية يجب أخذها بعين الاعتبار وهي معطاة وفق جداول موجودة في المراجع الهندسية.

العنفات البخارية

توجد هناك أربع قياسات هامة لأداء العنفة البخارية وهي معدّل بخار ومعدّل الحرارة والمردود الحراري ومردود المحرّك. ويبين الشكل 9.2 الدارات الأساسية التي يحسب وفقها أداء العنفة، وسنقدم الآن المعادلات المستخدمة لحساب هذه القياسات الأربع:

معدل الحرارة

ويعطى لجميع أنواع العنفات وفق العلاقة:

$$\text{معدّل البخار , lb/kWh} = \frac{\text{تدفق بخار الماء, lb/h } (W_1)}{\text{خرج المحور أو المولّد، kWh } (P)}$$

ومن أجل عنفات الضغط المعاد:

$$\text{معدل الحرارة , Btu/kWh} = \frac{W_1(h_1 - h')}{P}$$

حيث

h_1 = انثالبي البخار الداخل للعنفة، Btu/lb (انظر المخطط)، وعندما يتم خروج بخار الماء (من العنفة) لتتم معالجته فإن:

h' = انثالبي الماء الفعلي للبخار المطروح، Btu/lb.

أما عندما يتم خروج بخار الماء إلى الوسط الخارجي عندها:

h' = انثالبي الماء المشبع عند الضغط الذي يخرج به البخار من العنفة، Btu/lb (انظر المخطط).

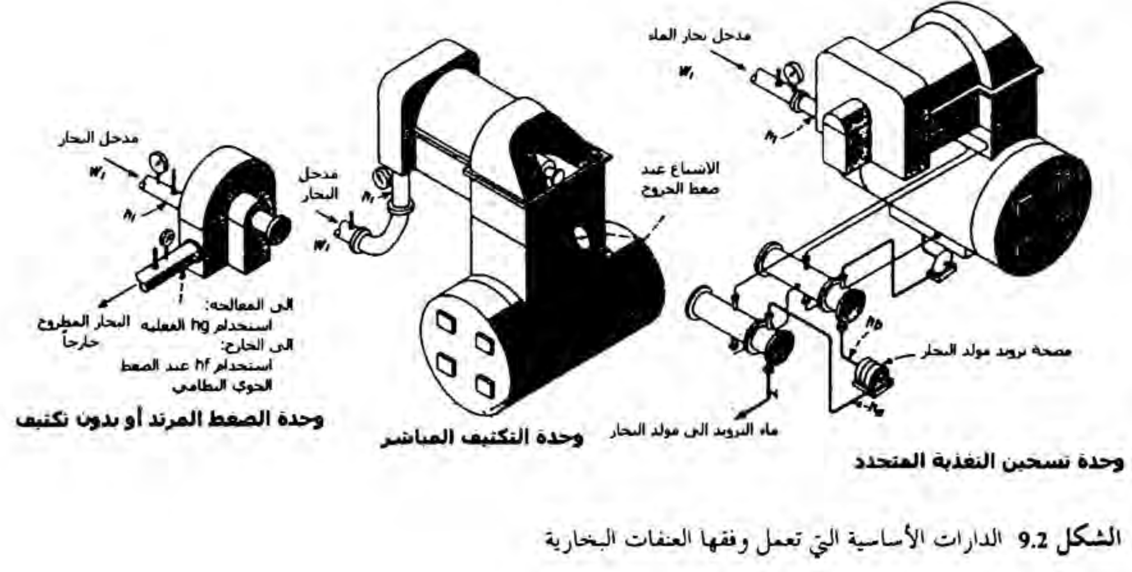
$$\text{مردود المحرّك} = \frac{3413P}{(W_1 - W_g)(h_1 - h_s) + W_g(h_1 - h_{sg})}$$

حيث

W_g = البخار الخارج من العنفة عبر السدادات (الجلب) والتسربات، lb/h.

h_s = انثالبي بخار الماء الخارج من العنفة عند نفس انتروبي بخار الماء الداخل، Btu/lb.

h_{sg} = انثالبي بخار التصريف عند نفس انتروبي بخار الماء الداخل للعنفة، Btu/lb.



الشكل 9.2 الدارات الأساسية التي تعمل وفقها العنفات البخارية

ومن أجل العنفات ذات التكثيف المباشر (straight - condensity turbines):

$$\text{معدل الحرارة, Btu/kWh} = \frac{(W_1 - W_g)(h_1 - h_f) + W_g(h_1 - h_{fg})}{P}$$

حيث

h_f = انثالبي الماء المشبع عند ضغط الخروج، Btu/lb (انظر المخطط).

h_{fg} = انثالبي التبخر لبخار الماء المتسرب عند ضغط التفريغ، Btu/lb.

$$\text{مردود المحرك} = \frac{3413P}{(W_1 - W_g)(h_1 - h_s) + W_g(h_1 - h_{sg})}$$

ومن أجل العنفات ذات التسخين المتجدد:

$$\text{معدل الحرارة, Btu/kWh} = \frac{W_1(h_1 - h_f) + P_1(h_a - h_b)}{P}$$

حيث

h_f = انثالبي ماء التزويد المغادر لآخر مسخّن، Btu/lb.

h_a = انثالبي ماء التزويد المغادر لمضخة تزويد المولّد، Btu/lb.

h_b = انثالبي ماء التزويد الداخل إلى مضخة تزويد المولّد، Btu/lb (انظر المخطط).

$$\text{مردود المحرك} = \frac{3413P}{\begin{array}{l} W_{b1}(h_1 - h_{sb1}) + W_{b2}(h_1 - h_{sb2}) \\ + \ldots + W_{bn}(h_1 - h_{sbn}) \\ + W_g(h_1 - h_{sg}) \end{array}}$$

حيث

$W_{b1}, W_{b2}, \ldots, W_{bn}$ = تدفقات بخار الماء الفائض، lb/h.

$h_{sb1}, h_{sb2}, \ldots, h_{sbn}$ = قيم الانثالبي لبخار الماء الفائض عند نفس انتروبي بخار الماء الداخل، Btu/lb.

W_e = تدفق بخار الماء المطروح، lb/h.

h_{se} = انثالبي بخار الماء المطروح عند نفس انتروبي بخار الماء الداخل، Btu/lb.

ويعطى المردود الحراري من أجل جميع أنواع العنفات بالعلاقة:

$$\text{المردود الحراري} = \frac{3413}{\text{معدل الحرارة، Btu per kWh}}$$

ويمكنك استخدام عوامل التحويل التالية لحساب المعادلات السابقة:

lb/kWh × 0.126 = Kg/MJ

lb/h × 0.454 = Kg/h

Btu/kWh × 0.95 = KJ/kWh

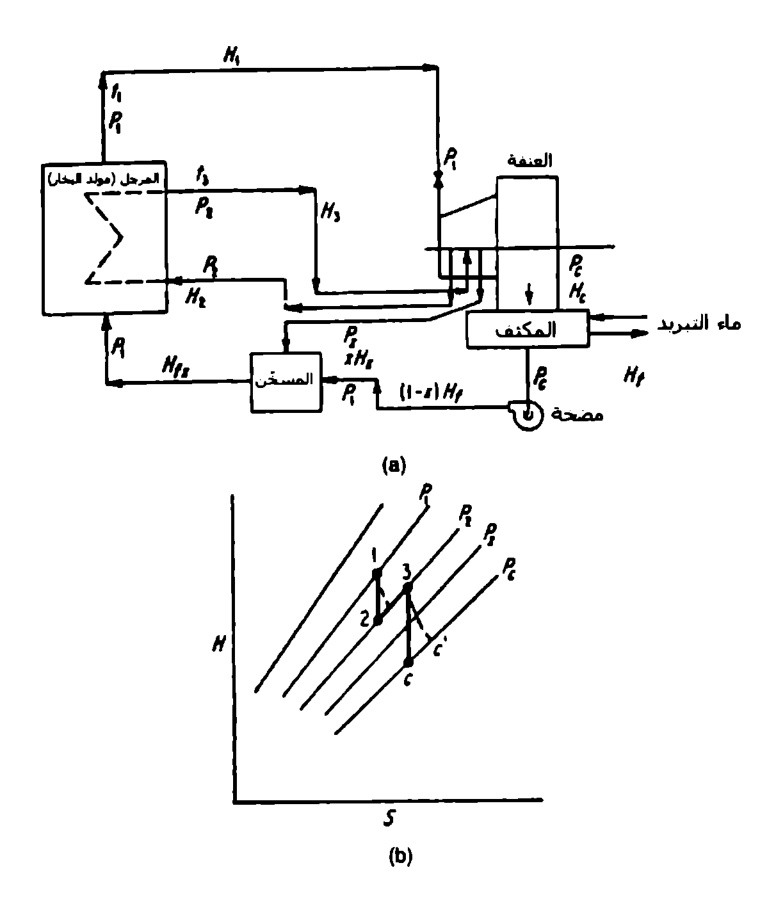
Btu/lb × 2.33 = KJ/Kg

معدل البخار للدارة ذات إعادة التسخين المتجدد

1. قم بتجميع قيم الانثالبي والانتروبي والضغوط للدارة (الشكل 9.3).
2. احسب نسبة بخار الماء الذاهبة لمسخّن ماء التزويد، حيث تعطى نسبة البخار اللازمة لمسخّن ماء التزويد

$$x = (H_{fx} - H_f)\,(H_x - H_f)$$

3. أوجد معدّل تدفق البخار إلى العنفة، ومن أجل دارة Rankine فإن، $w_s = 3413/(H_1 - H_c)$.



الشكل 9.3 (a) مخطط الدارة، (b) مخطط H-S للدارة المبينة في (a)

4. احسب المردود الحراري للعنفة، حيث يعطى المردود بالعلاقة:

$$E_t = [(H_1 - H_2) + x\,(H_3 - H_x) + (1 - x)\,(H_3 - H_c)]/(H_3 - H_2 + H_1 - H_{fx})$$

5. حدد شروط وظروف الإطراح (إخراج غازات العادم)، كما أن مردود المحرّك للعنفة يساوي إلى المردود المركب الفعلي للعنفة مقسوماً على المردود الفعلي للمولّد.

مردود مولد البخار التوربيني ومعدل البخار

يعطى المردود الحراري المركب ((Combined thermal efficiency (CTE)) بالعلاقة:

$$CTE = (3413/w_r)\ [1/(h_1 - h_2)]$$

حيث

w_r = معدّل تدفق بخار الماء المركب، lb/kWh (Kg/kWh).

h_1 = انثالبي بخار الماء عند ضغط ودرجة حرارة الفوهة، Btu/lb (KJ/Kg).

h_2 = انثالبي بخار الماء عند الضغط العائد من العنفة، Btu/lb (KJ/Kg)، ويتم ذلك باستخدام جداول بخار الماء ومخطط Mollier.

يعطى مردود المحرّك المركب (CEE)

$$= \frac{wi}{we}$$

$$= \frac{\text{وزن بخار الماء المستخدم من المحرّك النظري، lb/kWh}}{\text{وزن بخار الماء المستخدم من المحرّك الفعلي، lb/kWh}}$$

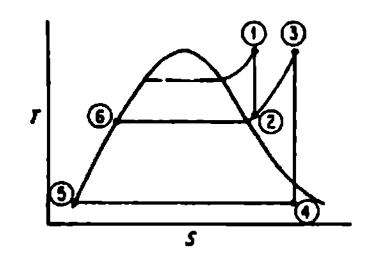
كما يمكن التعبير أيضاً عن أوزان بخار الماء بالواحدات btu/lb (Kj/Kg))، وبالتالي ستكون من أجل المحرّك النظري مساوية للقيمة 3413 Btu/lb (7952.3 KJ/Kg)، أما من أجل العنفة الفعلية فيستخدم الفرق $h_1 - h_{2x}$، حيث يمثل h_{2x} انثالبي بخار الماء الرطب عند شروط الإفلات، أما h_1 فكما عرفناها سابقاً.

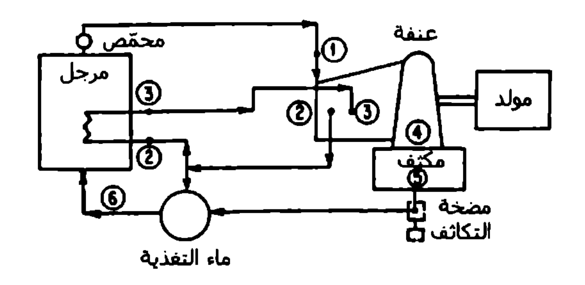
ولإيجاد قيمة CEE علينا أولاً الحصول على معدّل تدفق البخار النظري $w_i = 3413/(h_1 - h_{2x})$ وتستطيع استخدام هذه المنهجية لتحليل مردود أي مولّد توربيني مستخدم في منشآت المحطات المركزية والصناعية وفي السفن وفي منشآت أخرى.

دارة المولد التوربيني ذو الحرارة المستعادة: تحليل اختياري

1. قم وباستخدام جداول بخار الماء ومخطط Mollier بإنشاء قائمة تحوي شروط البخار عند نقاط الدارة المبينة بالشكل 9.4. مع اعتبار الدليل 1 لشروط الخنق، وستحوي القائمة القيم التالية:

$P_1, t_1, h_1, S_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$





الشكل 9.4 رسم توضيحي للنقاط الهامة في الدارة وموافقاتها على مخطط T-S

2. حدد النسبة المئوية لبخار الماء الذاهب إلى مسخن ماء التغذية. وحدد نسبة مسخّن ماء التغذية وهي

$$\frac{\text{كمية الحرارة المضافة في مسخن ماء التغذية}}{\text{كمية الحرارة المعطاة للمسخن}} \times 100$$

3. أوجد كمية الحرارة المحوّلة إلى عمل لكل باوند (كغ) من بخار الماء الخارج من الخانق. ويعبّر عن كمية الحرارة المحوّلة إلى عمل بفرق الانثالبي بين انثالبي بخار الماء الخارج من الخانق وانثالبي البخار المستنـــزف عند النقطة 2 مضافاً له فرق الانثالبي بين النقطتين 3 و4 مضروباً بالنسبة المئوية لتدفق البخار من تدفق البخار الخارج من الخانق والموافق لهاتين النقطتين.

ويعبّر عنها بصيغة معادلة على الشكل التالي:

كمية الحرارة المحوّلة إلى عمل $= H_1 - H_2 + (1.00 - p)(H_3 - H_4)$

حيث

p = هي النسبة المئوية لبخار الماء المستنـــزف لتسخين ماء التغذية في مسخن ماء التغذية.

4. احسب كمية الحرارة المقدمة لكل باوند (كغ) من بخار الماء الخارج من الخانق. والتي تعطى بالعلاقة: $H_1 - H_6 + H_3 - H_2$ = كمية الحرارة المقدمة لكل باوند (كغ) من بخار الماء الخارج من الخانق

5. احسب المردود الحراري النظري عن طريق استخدام هذه العلاقة:

$$\text{المردود الحراري النظري} = \frac{\text{كمية الحرارة المحولة إلى عمل}}{\text{كمية الحرارة المقدمة}}$$

أداء منشآت الطاقة اعتماداً على بيانات اختبار

1. حدد خواص بخار الماء عند النقاط الهامة من الدارة، وباستخدام مخطط Mollier وجداول بخار الماء ارسم الدارة كما في الشكل 9.5، ونستطيع إيجاد النسبة المئوية لبخار الماء المستنـــزف بالعلاقة:

$$100 \times (H_5 - H_4)/(H_2 - H_4)$$

2. أوجد كمية الحرارة المحوّلة إلى عمل، ويمكنك استخدام العلاقة:

كمية الحرارة المحوّلة إلى عمل $h_w = H_1 - H_2 + (1 - m_2)(H_2 - H_7)$

حيث

m_2 = تمثل النسبة المئوية لبخار الماء المستنـــزف بالنسبة لتدفق البخار الخارج من الخانق.

H_7 = انثالبي بخار الماء الخارج من العنفة والداخل إلى المكثف.

3. احسب تدفق بخار الماء النظري من العلاقة:

تدفق بخار الماء النظري $r = (3413\ Btu/kWh)/h_w$

وبالتالي مردود الدارة

$$Ce = \frac{\text{كمية الحرارة المحولة إلى عمل}}{\text{كمية الحرارة المقدمة}}$$

4. حدد تدفق بخار الماء المركّب، ويحدد تدفق بخار الماء المركّب ولوحدة فعلية بالعلاقة:

$$R_C = \frac{\text{بخار ماء مستهلك lb}}{\text{مولدة kWh}}$$

5. أوجد المردود الحراري المركّب لوحدة فعلية، والذي يعطى بالعلاقة:

$$TE_C = \frac{3413}{\text{كمية الحرارة المقدمة}}$$

6. احسب المردود المحرّك المركّب، حيث أنه يساوي إلى TE_c/C_c =

المنشآت الهيدروكهربائية والعنفات الهيدروليكية

رموز واختصارات

Q = التدفق، ft^3/s (m^3/s).

H = ارتفاع (ذروة) الموقع، ft (m).

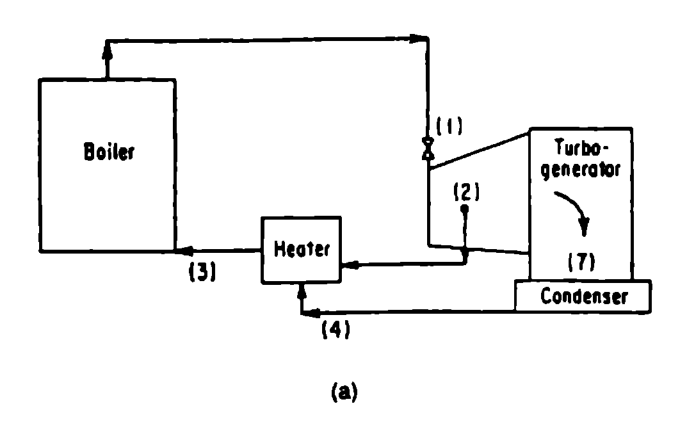
σ = معامل التكهف.

H_b = قراءة البارومتر، ft (m).

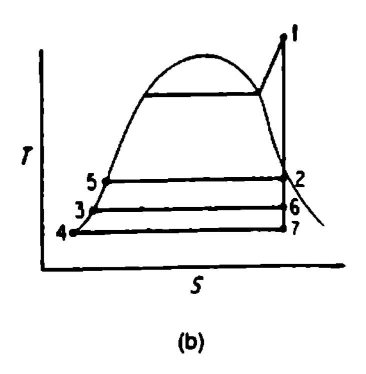
H_v = ضغط التبخر، ft (m).

H_s = ارتفاع السحب الستاتيكي للموقع، ويقاس من سطح المجرى المائي إلى طرف ريشه الدوار ft (m).

H_e = الارتفاع الفعّال، ft (m).



(a)



(b)

الشكل 9.5 رسم لدارة بخار ماء

استطاعة الماء

يُعطى خرج القدرة النظري لتوضع هيدروليكي بالعلاقة:

$$\text{Water}\,hp = \frac{QH}{8.8}$$

أو

$$\text{Water kW} = \frac{QH}{11.8}$$

السرعة النوعية

تُعرَّف السرعة النوعية لعنفة هيدروليكية بشكل مختلف عملياً عن تعريفها في المضخات. فهنا يكون ارتفاع الموقع وخرج القدرة مرتبطان بشكل وثيق، مما يجبرنا على أن نعرف السرعة النوعية على أنها تلك السرعة لوحدة ذات قطر مناسب وخصائص متماثلة والتي تعمل على إعطاء حصان بخاري واحد (0.754 kW) عند ارتفاع سائل مقداره قدم واحد (0.3048 m) أو:

$$N_s = \text{specific speed} = \frac{\text{rpm} \times \text{shp}^{0.5}}{\text{head}^{1.25}}$$

التكهف

يجب أن يتوضع الدولاب المائي على ارتفاع يأخذ بعين الاعتبار مستوى سطح الماء بحيث نتجنب ظاهرة التكهف، ويجب أن لا تصمم الوحدة للعمل تحت قيم متدنية لمعامل التكهف والذي يعرَّف كما يلي:

$$\sigma = H_b - H_v - \frac{H_s}{H_e}$$

المكثفات ذات السطوح للعنفات البخارية

يعطى تدفق ماء التبريد لمكثف سطحي (الشكل 9.6) بالعلاقة:

$$G = \frac{950S}{500(t_2 - t_1)} = \frac{1.9S}{t_2 - t_1}$$

حيث

G = تدفق ماء التبريد، gal/min.

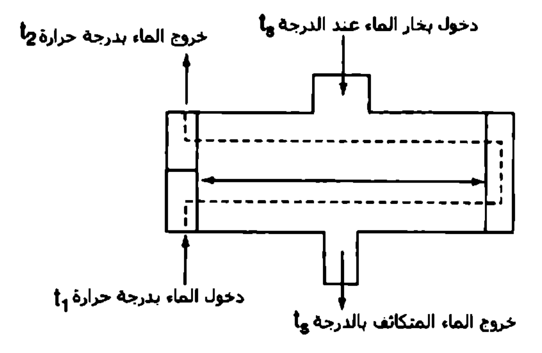
S = كمية البخار المتكاثفة، lb/h.

t_2 = درجة حرارة الماء الخارج، °F.

t_1 = درجة حرارة الماء الداخل، °F.

(ملاحظة: افترضنا أنه ستتم إزالة 950 Btu من كل ليبرة واحدة من بخار الماء)، وتُعطى مساحة سطح أنبوب المكثف بالعلاقة:

$$A = \frac{kL}{V}G$$



الشكل 9.6 درجات حرارة المكثف ذو السطح والمستخدمة في حسابات الأداء

حيث

A = مساحة سطح المكثف، ft^2.

k = ثابت معطى في المراجع الهندسية.

L - طول الأنبوب لكل تمريرة، ft.

V - سرعة الماء، ft/s.

وتعطى درجة حرارة الماء الخارج من المكثف بالعلاقة:

$$t_2 = t_N - \frac{t_N - t_1}{e^x}$$

حيث

x = (k/V) (U/500)

$e^x = 2.7183^x$ ويعطى في المراجع الهندسية.

t_N - درجة حرارة الإشباع لبخار الماء الموافقة للضغط المطلق داخل المكثف، °F.

U - معدّل انتقال كمية الحرارة، LMTD Btu/(ft^2.h.°F).

التوازن الحراري لمولد البخار

عادةً ما نقوم بإيجاد التوازن الحراري لمولّد البخار وذلك لإظهار وبيان توزع كمية الحرارة المولّدة من احتراق ليبرة واحدة من الوقود، وسنعدد فيما يلي الحدود اللازمة لحساب هذا التوازن:

1. كمية الحرارة التي يمتصها مولّد البخار (المرجل) [المعادلة a].
2. كمية الحرارة الضائعة مع غازات العادم الجافة [المعادلة b].
3. بخار الرطوبة المشكّل عبر احتراق الهيدروجين في الوقود [المعادلة c].
4. بخار الرطوبة السطحية للوقود [المعادلة d].
5. الضياعات الناتجة عن الاحتراق غير الكامل [المعادلة e].
6. الضياعات الناتجة عن ذرات الكربون غير المحترقة في الرماد [المعادلة f].

7. كمية الحرارة الضائعة اللازمة لتسخين الرطوبة الموجودة في الهواء [المعادلة g].

8. ضياعات الإشعاع والضياعات الأخرى غير المأخوذة بعين الاعتبار.

ويمكن حساب هذه الحدود كما يلي:

(المعادلة a)

$$h_1 = W (H - h_f)$$

حيث

W = ليبرة ماء متبخر فعلياً لكل ليبرة وقود محترقة، lb/lb.

H = كمية الحرارة الموجودة في ليبرة من بخار الماء عند شروط الخروج، أي عند مخرج المحمّص إذا كانت هناكُ عملية تحميص.

h_f = كمية الحرارة التي تحملها ليبرة واحدة من ماء التغذية الداخل لمولّد البخار.

(المعادلة b)

$$h_2 = W_g (T_g - t_r) C_p$$

حيث

W_g = ليبرة من غازات المدخنة الجافة (من مخطط الاحتراق) لكل ليبرة وقود محترقة، lb/lb.

C_p = الحرارة النوعية للغازات (تؤخذ عادة بقيمة 0.24).

T_g = درجة حرارة غازات المدخنة.

t_r = درجة حرارة الهواء الداخل إلى الفرن.

(المعادلة c)

$$h_s = 9h [212 - t_c + 970.3 + 0.46 (T_g - 212)]$$

حيث

h = كمية الهيدروجين كجزء من ليبرة وقود محترقة.

9h = كمية الماء المتشكل.

t_c = درجة حرارة احتراق الوقود.

(المعادلة d)

$$h_4 = w\,[212 - t_c + 970.3 + 0.46\,(T_g - 212)]$$

حيث

W = ليبرة رطوبة سطح لكل ليبرة وقود محترقة، lb/lb، ويجب أخذ النتائج النهائية بعين الاعتبار.

h_c = 14,150. أيضاً سيضيع 3960 Btu/lb من جراء تحول C إلى CO.

(المعادلة e)

$$h_5 = \frac{CO}{CO + CO_2}(14{,}150 - 3960)C_b$$

حيث

CO = النسبة المئوية لغاز CO وتؤخذ من تحليل غازات المدخنة.

CO_2 = النسبة المئوية لغاز CO_2 وتؤخذ من تحليل غازات المدخنة.

C_b = وزن الكربون لكل ليبرة من الوقود المحترق فعلياً.

والكربون الكلي = C = $C_b + C_a$

(المعادلة f)

$$h_6 = 14{,}150 \times \frac{W_a}{W} \times C_a$$

حيث

W_a = وزن الرماد المتجمع خلال فترة الوحدة (فترة محددة).

W = وزن الوقود المحترق خلال فترة الوحدة.

C_a = النسبة المئوية للمواد القابلة للاحتراق في الرماد (يفترض عادة بأن يكون الكربون).

(المعادلة g)

$$h_7 = M0.46\,(T_g - t_r)$$

حيث

M = الوزن الفعلي للرطوبة لكل باوند من الهواء الجاف مأخوذة وفق مقياس الرطوبة ذو الحوجلة الجافة والرطبة.

أما البند الثامن من الضياعات فيؤخذ على أنه الفرق بين مجموع المعادلات السبعة السابقة وبين قيمة كمية الحرارة الموجودة في ليبرة وقود محترقة.

انخفاض الضغط في مجاري الهواء المستقيمة لمجاري مولد البخار

لقد قدمت شركة Buffalo Forge Company هذه المعادلة والمقبولة ضمن مجال لرقم رينولدز يتراوح من 25,000 إلى 5,000,000 والذي يغطي عملياً كامل المجال المتعلق بعمل منشأة الطاقة.

$$\Delta p = \frac{1.64 F L_{\mu}^{0.16} \rho^{0.84}}{d^{1.24}} \left(\frac{V}{1000}\right)^{1.84}$$

$$= \frac{0.03 F L}{d^{1.24}} \left(\frac{V}{1000}\right)^{1.84}$$

وذلك من أجل هواء بدرجة حرارة (21.1 °C) 70 °F وبضغط بارومتري 29.92 in (759.9 mm).

حيث

ΔP = انخفاض الضغط مقدراً بالإنش عمود ماء.

F = 0.80 للأنابيب الملساء والزجاج.

F = 1.00 لمجاري الهواء المصنوعة من الحديد وتتضمن الأنابيب الفولاذية.

F = 1.20 للأنابيب المصنوعة من الآجر والاسمنت الخشن والأنابيب المبرشمة بشكل كبير.

L = طول الأنبوب، ft (m).

μ = لزوجة الهواء أو الغاز، lb/(ft.s) [Kg/(m.s)].

ρ = قطر مجرى الهواء، in (mm).

$$= \frac{2 \times \text{الطول} \times \text{العرض}}{\text{الطول} + \text{العرض}}$$ للمجاري مستطيلة المقطع

v = السرعة، ft/min(m/min)

يمكن استخدام العلاقة السابقة لحل ضياعات الاحتكاك للأجزاء المستقيمة من المجاري العاملة ولإيجاد الاحتكاك في المداخن.

الأنابيب التي على شكل U ومقاييس الضغط والسحب

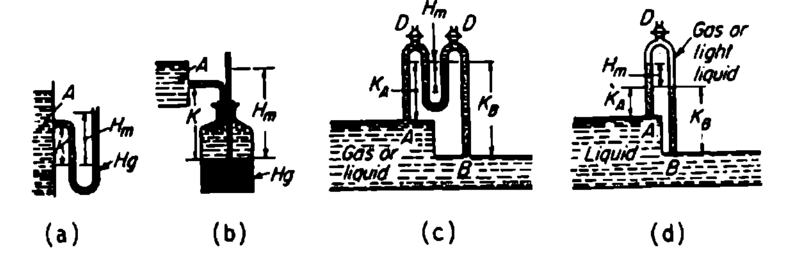
الأنابيب التي على شكل U (الشكل 9.7 a و b)

إذا كان الاختلاف في المنسوب بين مستوى الزئبق والمائع المراد قياس ضغطه بمقدار K ft (m) تحت نقطة الاتصال بينهما A وسيعطي قراءة H_m ft (m) بحيث يكون

$$p_A = H_m\overline{W}_m - K\overline{W}_A$$

عند A

$$H_A = \frac{H_m\overline{W}_m}{\overline{W}_A - K}$$



الشكل 9.7 أنواع مختلفة لمقاييس الضغط

حيث

$\overline{W}_A$ = الكثافة الوزنية للمائع عند النقطة A، lb/ft^3 (Kg/m^3).

$\overline{W}_m$ = كثافة مائع مقياس الضغط، lb/ft^3 (Kg/m^3).

P_A = الضغط المقاس عند النقطة A، lb/ft^2 (kPa).

انبوب U التفاضلي

يبين الشكل 9.7c الفرق بين ضغطي القمتين A وB واللذان يعطيان كما يلي:

$$p_A - p_B = H_m(\overline{W}_m - \overline{W}_A) + K_A\overline{W}_A - K_B\overline{W}_B \quad *$$

حيث

K_A، K_B = المسافتين الشاقوليتين بين سطح الزئبق العلوي والنقطتين A وB، ft (m).

$\overline{W}_A$، $\overline{W}_B$ = الكثافة الوزنية للمائع عند النقطتين A وB، lb/ft^3 (Kg/m^3).

إذا كان الفرق (التفاضل) بين المستويين ناتجاً عن فتحة أو جهاز آخر لقياس تدفق السائل، فعندها يعطى الفرق في الارتفاع عند تلك الفتحة بالعلاقة:

$$\Delta H = p_2 v_1 - p_2 v_2 + Z_1 - Z_2 = H_m\left(\frac{\overline{W}_m}{\overline{W}_A} - 1\right)$$

وتكون في معظم الغازات - عدا تلك الموجودة تحت ضغوط عالية جداً - قيمة $\overline{W}_A$ و $\overline{W}_B$ صغيرتين جداً بالمقارنة مع $\overline{W}_m$ مما يخفض حدود المعادلة قبل السابقة ويجعلها كما يلي:

$$p_A - p_B = H_m\overline{W}_m$$

انبوب U التفاضلي المقلوب (الشكل 9.7d)

$$p_A - p_B = H_m(\overline{W}_A - \overline{W}_m) + K_A\overline{W}_A - K_B\overline{W}_B$$

وإذا كان القياس يدل على فرق الارتفاع التفاضلي للفتحة وقمة المقياس، والوسيط العامل هو سائل فإن فرق الارتفاع يعطى بالعلاقة:

$$\Delta H = H_m\left(1 - \frac{\overline{W}_m}{\overline{W}_A}\right)$$

الأنابيب المغلقة التي على شكل U

تقيس هذه الأنابيب الضغط المطلق للمائع بشكل مباشر P (الشكل 9.8a).

$$p = H_m \overline{W}_m$$

حيث

$\overline{W}_m$ = lbm/ft³ (Kgm/m³) = الكثافة الوزنية لمائع مقياس الضغط.

H_m = ارتفاع مائع مقياس الضغط ft (m).

إذا أردنا قياس ضغط السوائل أو الغازات الموجودة تحت ضغوط عالية جداً فيجب طرح الكمية $K\overline{W}_0$ من المعادلة السابقة.

المقاييس المضاعفة

أنابيب U المائلة (الشكل 9.8c). إذا كانت قيمة القراءة R ft (m)، فيجب عندها تبديل قيمة H_m بالقيمة $H_m = (R - R_o) \sin\theta$ عند حساب العلاقة *، حيث R_o تمثل القراءة الصفرية.

مقياس السحب. تطبق المعادلات كما طبقناها في المقياس المائل السابق (الشكل 9.8b).

أنابيب U ذات المائعين (الشكل 9.8 d وe)

من أجل النوع I يمكننا كتابة المعادلة:

$$p_A - p_B = R - R_0\left(\overline{W}_2 - \overline{W}_1 + \frac{a}{A}\overline{W}_1\right)$$

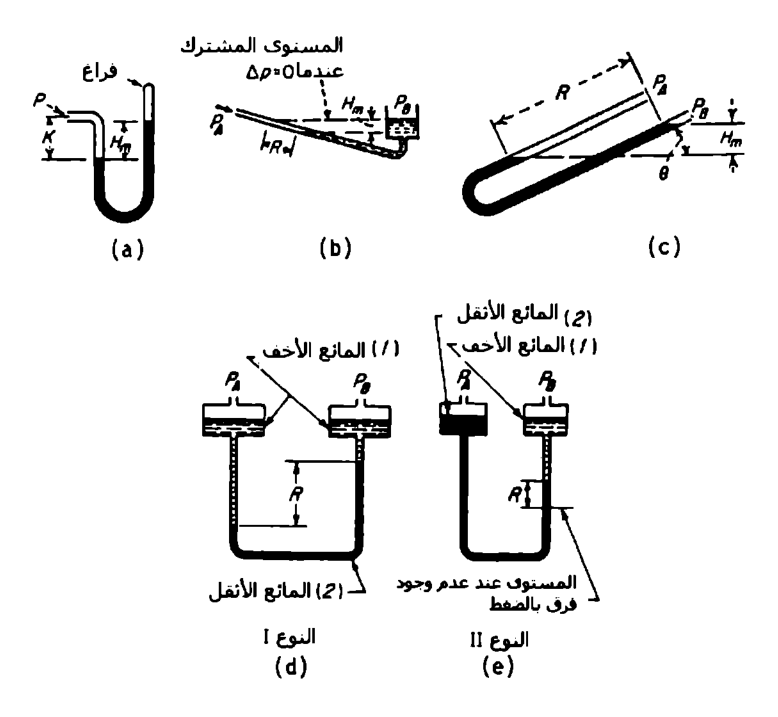
ومن أجل النوع II يمكننا أيضاً كتابة المعادلة:

$$p_A - p_B = R\left[\overline{W}_2 - \overline{W}_1 + \frac{a}{A}(\overline{W}_2 + \overline{W}_1)\right]$$

حيث

A – مساحة مقطع كل من الخزانين، (m^2) ft^2.

a – مساحة مقطع الأنبوب الذي يشكل الحرف U، (m^2) ft^2.



الشكل 9.8 أنواع إضافية لمقاييس الضغط

10

معادلات خاصة بهندسة الموائع

لتبسيط استخدام المعادلات في هذا الفصل سنقوم بإيراد الرموز والاختصارات والواحدات الموافقة لكل تعبير في الجملتين U.S Customary System (USCS) والنظام الدولي System International (SI) في الجدول 10.1.

الخاصة الشعرية

تنتج ظاهرة الخاصة الشعرية عن قوى الترابط بين جزئيات السائل وقوى الالتصاق لجزيئات السائل، والتي تتجلى كاختلاف في ارتفاع سطح السائل بين خارج وداخل أنبوب رفيع مغموس أحد طرفيه في السائل (الشكل 10.1).

ويعبّر عن الخاصة الشعرية بمقدار ذلك الارتفاع الذي يعطى وفق المعادلة:

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{(w_1 - w_2)r}$$

حيث

h = الارتفاع الناتج عن الخاصة الشعرية، ft (m).

σ = قوى الشد السطحي، lb/ft (N/m).

W_1، W_2 = الوزن النوعي للمائع تحت وفوق السطح السائل المقعر (أو المحدب) على الترتيب، lb/ft (N/m).

θ = زاوية التماس.

r = نصف قطر الأنبوب الشعري، ft (m).

تنقص الخاصة الشعرية - مثل قوى الشد السطحي - مع ازدياد درجة الحرارة، ولكن التغير في درجة حرارة المائع عادةً ما يكون صغيراً ومهملاً في معظم التطبيقات العملية.

الجدول 10.1 الرموز والمصطلحات والأبعاد والواحدات المستخدمة في الهندسة المائية

الرمز	المصطلح	الأبعاد	واحدات USCS	الواحدات الدولية SI
A	المساحة	L^2	ft^2	mm^2
C	معامل خشونة chezy	$L^{1/2}/T$	ft^5/s	$m^{0.5}/s$
C_1	معامل خشونة Hazen-Williams	$L^{0.37}/T$	$ft^{0.37}/s$	$m^{0.37}/s$
d	العمق	L	ft	m
d_c	العمق الحرج	L	ft	m
D	القطر	L	ft	m
E	معامل المرونة	F/L^2	lb/in^2 (psi)	MPa
F	القوة	F	lb	N
g	تسارع الجاذبية الأرضية	L/T^2	ft/s^2	m/s^2
H	الارتفاع الكلي، ارتفاع سد	L	ft	m
h	الارتفاع	L	ft	m
h_f	ضياع الارتفاع الناتج عن الاحتكاك	L	ft	m
L	الطول	L	ft	m
M	الكتلة	FT^2/L	$lb.s^2/ft$	$N.s^2/m$
n	معامل خشونة Manning	$T/L^{1/3}$	$s/ft^{1/3}$	$s/m^{1/3}$
P	المحيط، ارتفاع السد	L	ft	m
P	القوة الناتجة عن الضغط	F	lb	N
p	الضغط	F/L^2	lb/ft^2	MPa
Q	معدّل التدفق	L^3/T	ft^3/s	m^3/s
q	معدّل تدفق الوحدة	$L^3/T.L$	$ft^3/(s.ft)$	$m^3/(s.m)$
r	نصف القطر	L	ft	m
R	نصف القطر الهيدروليكي	L	ft	m

الرمز	المصطلح	الأبعاد	واحدات USCS	الواحدات الدولية SI
T	الزمن	T	s	s
t	الزمن، السماكة	T, L	s, ft	s, m
V	السرعة	L/T	ft/s	m/s
W	الوزن	F	lb	kg
w	الوزن النوعي	F/L^3	lb/ft^3	kg/m^3
y	عمق قناة مفتوحة أو المسافة من دعامة صلبة	L	ft	m
Z	الارتفاع فوق القدْر	L	ft	m
∊	حجم الخشونة	L	ft	m
μ	اللزوجة	FT/L^2	lb.s/ft	kg.s/m
ν	اللزوجة الحركية	L^2/T	ft^2/s	m^2/s
ρ	الكثافة	FT^2/L^4	$lb.s^2/ft^4$	$kg.s^2/m^4$
σ	قوى الشد السطحي	F/L	lb/ft	kg/m
τ	إجهادات القص	F/L^2	lb/in^2	MPa

اللزوجة

تعتبر لزوجة المائع μ - والتي تدعى أيضاً بمعامل اللزوجة أو اللزوجة المطلقة أو اللزوجة الحركية - مقياساً لمقاومة المائع للتدفق، والتي يعبّر عنها بالنسبة بين إجهادات القص المماسية بين الطبقات المتدفقة وبين معدّل تغير السرعة مع العمق:

$$\mu = \frac{\tau}{dV / dy}$$

حيث

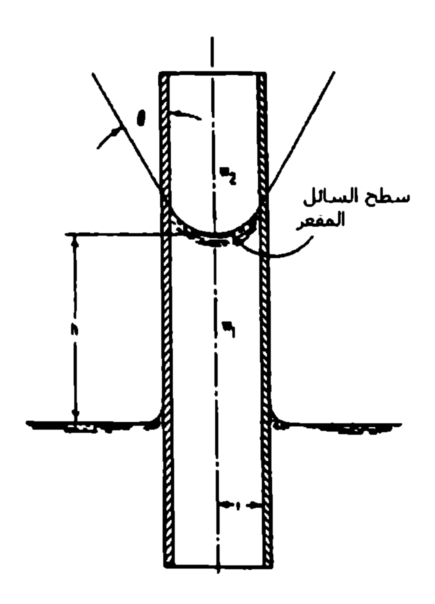
τ = إجهاد القص، lb/ft^2 (N/m^2).

V = السرعة، ft/s (m/s).

y = العمق، ft (m).

الجدول **10.1** الرموز والمصطلحات والأبعاد والواحدات المستخدمة في الهندسة المائية /تتمة/

الرمز	المصطلح	الأبعاد	واحدات USCS	الواحدات الدولية SI
		رموز المقادير اللابعدية		
الرمز	المقدار			
C	معامل السد، معامل الامتلاء			
C_c	معامل التقلص			
C_v	معامل السرعة			
F	عدد Froude			
f	معامل احتكاك Darcy-Weisbach			
L	معامل ضياع الارتفاع			
R	رقم Reynolds			
S	انحدار الاحتكاك، انحدار خط تدرج الطاقة			
S_c	الانحدار الحرج			
η	المردود			
sp gr	الجاذبية النوعية			



الشكل 10.1 الخاصة الشعرية لارتفاع ماء في انبوب شعري، سطح السائل مقعر للأعلى

تتناقص اللزوجة بارتفاع درجة الحرارة ولكن يمكن افتراضها مستقلة عن التغيرات في الضغط في معظم المسائل الهندسية، وتكون لزوجة الماء عند الدرجة 70 °F (21.1 °C) مساوية للقيمة 0.00002050 $lb.s/ft^2$ (0.00098 $N.s/m^2$).

وتعـرّف اللزوجة الحركية ν على أنها اللزوجة μ مقسمة على الكثافة ρ، وسميت باللـزوجة الحـركية فقط لأجل واحداتها – ft^2/s (m^2/s) – التي هي تركيب من واحدات الحركة (الطول والزمن). ويملك الماء عند الدرجة 70 °F (21.1 °C) لزوجة حركية مساوية للمقدار 0.00001059 ft^2/s (0.000001 m^2/s).

وغالـباً ما نصادف اللزوجة في علم الموائع عند حساب رقم رينولدز الذي يحدد نوعية الجريان هل هو صفحي أو انتقالي أو مضطرب تماماً.

مدخل إلى جريان الموائع

تعبّر معادلة برنولي عن قانون تحوّل القدرة في الموائع والتي لها الشكل التالي:

$$Z_1 + \frac{p_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g}$$

حيث

Z_1 = الارتفاع - (m) ft - عند أي نقطة 1 من المائع الجاري والواقعة فوق مستوي مرجعي مساعد.

Z_2 = الارتفاع - (m) ft - لنقطة 2 من المائع أخفض من النقطة الأولى ولكنها واقعة فوق المستوي المرجعي.

P_1 = الضغط عند النقطة 1، lb/ft^2 (kPa).

P_2 = الضغط عند النقطة 2، lb/ft^2 (kPa).

w = الوزن النوعي للمائع، lb/ft^3 (kg/m^3).

V_1 = سرعة المائع عند النقطة 1، ft/s (m/s).

V_2 = سرعة المائع عند النقطة 2، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية الأرضية = $32.2\ ft/s^2$ ($9.81\ m/s^2$).

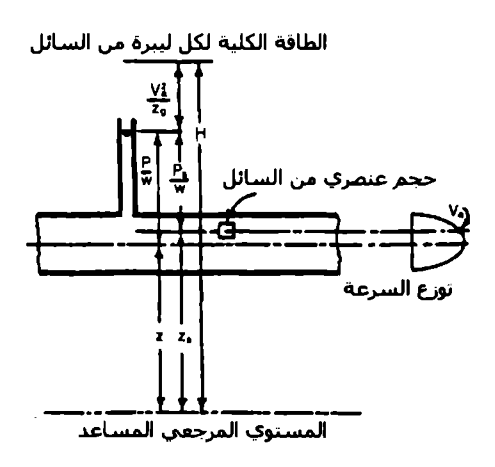
يعبر الطرف الأيسر من المعادلة عن مجموع القدرة (الطاقة) الكلية لكل وحدة وزن من المائع عند النقطة 1، وكذلك يعبر الطرف الأيمن عن الطاقة الكلية لكل وحدة وزن من المائع عند النقطة 2. من الجدير بالذكر أن معادلة برنولي السابقة تطبق فقط على المائع المثالي، ولاستخدامها في التطبيقات العملية يجب إضافة حد آخر يتعلق بالاحتكاك والذي يقوم بإنقاص الارتفاع الكلي ((m) ft)، ولنرمز له بالرمز h_f والذي يضاف إلى الحد المعبّر عن النقطة الأخفض بالنسبة للجريان، وستصبح عندها معادلة برنولي كما يلي:

$$Z_1 + \frac{p_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

تتعلق القدرة المحتواة في حجم عنصري من المائع بارتفاعه وسرعته وضغطه (الشكل 10.2).

تسمى الطاقة المتعلقة بالارتفاع بالطاقة الكامنة وتساوي إلى WZ_a – حيث يدل W على وزن المائع الموجود في الحجم العنصري lb (Kg) وZ_a يدل على ارتفاعه ft (m) – وذلك بالنسبة لمستوي مرجعي مختار.

تسمى الطاقة الناتجة عن السرعة بالطاقة الحركية، والتي تساوي إلى $WV_a^2/2g$ – حيث يدل V_a على السرعة ft/s (m/s)، بينما تساوي طاقة الضغط إلى $W P_a/W$ – حيث P_a يدل على الضغط lb/ft^2 (kPa)، و w الوزن النوعي للمائع lb/ft^3 (Kg/m^3) –.



الشكل 10.2 تعتمد طاقة السائل على الارتفاع والسرعة والضغط

تعطى الطاقة أو القدرة الكلية الموجودة في حجم عنصري من المائع بالعلاقة التالية:

$$E = WZ_a + \frac{Wp_a}{w} + \frac{WV_a^2}{2g}$$

وبتقسيم طرفي المعادلة السابقة على الحد W نحصل على الطاقة لكل وحدة وزن من المائع الجاري أو الارتفاع الكلي ft (m):

$$H = Z_a + \frac{p_a}{w} + \frac{V_a^2}{2g}$$

حيث يسمى الحد Pa/w بارتفاع الضغط، و $V_a^2 / 2g$ بارتفاع السرعة.

وكمـــا هـــو مبين في الشكل 10.2 يعتبر الحد $z + p/w$ ثابتاً لأي نقطة من المقطع وعمـــودي علـــى اتجاه الجريان داخل الأنبوب أو القناة، وتتغير الطاقة الحركية في نقـــاط المقطع تبعاً للسرعة. وعادةً ما نأخذ الحد $Z + p/w$ عند النقطة الواقعة على محور الأنبوب أو القناة، كما وتؤخذ السرعة المتوسطة لكامل المقطع وذلك عندما نريد تطبيق معادلة برنولي على الجريان داخل المقطع أو عندما يراد تحديد الارتفاع الكلي.

تحسب السرعة المتوسطة – ft/s (m/s) بالعلاقة Q/A

حيث

Q – يمثل التدفق الحجمي ft^3/s (m^3/s).

A – مساحة مقطع الجريان ft^2 (m^2).

مماثلة النماذج الفيزيائية

يعتـــبر النموذج الفيزيائي نظاماً يمكن استخدامه لإعطاء خصائص أو ميزات نظام مشابه أو منتج ابتدائي عادةً ما يكون أكثر تعقيداً أو مبنى بمقياس أكبر بكثير.

وتشكل نسبة قوى الجاذبية واللزوجة والشد السطحي إلى قوة العطالة رقم Froude ورقم Reynolds ورقم Weber على التوالي. وتدل مساواة رقم Froude للنموذج مع رقم Froude للنموذج الأصلي على تناسب قوى الجاذبية على قوى العطالة لكل منهما، وبشكل مشابه يدل تساوي رقم Reynolds للنموذج وللنموذج الأصلي على تناسب قوى اللزوجة على قوى العطالة لكلٍ منهما، أما إذا تساوت قيمة رقم Weber لهما فهذا يعني أن قوى الشد السطحي قوى العطالة متناسبة أيضاً.

يعطى رقم Froude بالعلاقة:

$$F = \frac{V}{\sqrt{Lg}}$$

حيث

F – رقم Froude (رقم لا بعدي).

V – سرعة المائع، ft/s (m/s).

L – بعد طويل (طول مميز مثل العمق أو القطر)، ft (m).

g – تسارع الجاذبية الأرضية = $32.2\ ft/s^2\ (9.81\ m/s^2)$.

إذا كانت لدينا منشأة هيدروليكية – مثل قناة تصريف الفائض والسد – ويتغير فيها شكل سطح الماء بسرعة فإن القوتين المهيمنتين (المسيطرتين) هما قوى الجاذبية وقوى العطالة، ولذلك فيجب أن يكون رقم Froude للنموذج وللنموذج الأصلي متساويين كما يلي:

$$F_m = F_p \quad \frac{V_m}{\sqrt{L_m G}} = \frac{V_p}{\sqrt{L_p g}}$$

حيث يدل الدليل m على النموذج، والدليل p على النموذج الأصلي.

ويعطى رقم Reynolds بالعلاقة:

$$R = \frac{VL}{\nu}$$

ويعتبر رقم رينولدز R رقماً لا بعدياً، ويدل الرمز v على اللزوجة الحركية للمائع، ft^2/s (m^2/s). ويكون رقما رينولدز للنموذج والنموذج الأصلي متساويين إذا كانت قوى اللزوجة والعطالة متناسبتين لكلٍّ منهما.

وتصبح قوى اللزوجة هي المهيمنة عندما يتدفق المائع ضمن نظام مغلق، مثل التدفق ضمن أنبوب لا يحوي أي سطح حر. ونحصل على المعادلات التالية عبر مساواة رقمي رينولدز للنموذج والنموذج الأصلي:

$$\frac{V_m L_m}{\nu_m} = \frac{V_p L_p}{\nu_p} \qquad V_r = \frac{\nu_r}{L_r}$$

يعتبر العاملان المتغيران واللذان يقيدان تصميم النموذج عند اعتبار رقم رينولدز هما نسبة الطول ونسبة اللزوجة.

يعطى رقم Weber بالعلاقة التالية:

$$W = \frac{V^2 L\rho}{\sigma}$$

حيث

ρ – كثافة المائع، $lb.s^2/ft^4$ ($Kg.s^2/m^4$) (الوزن النوعي مقسماً على g).

σ – قوة الشد السطحي للمائع، lb/ft^2 (kPa).

يتساوى رقمي Weber للنموذج والمنتج الأولي لأنواع معينة من دراسات الموجات.

في حالة تدفق الماء ضمن الأقنية المفتوحة والأنهار حيث يعتبر انحدار الاحتكاك ثابتاً نسبياً، تعتمد غالباً تصميمات النماذج على معادلة Manning. وتحدد النسب بين النموذج والنموذج الأصلي كما يلي:

$$\frac{V_m}{V_p}=\frac{(1.486/n_m)R_m^{2/3}S_m^{1/2}}{(1.486/n_p)R_p^{2/3}S_p^{1/2}}$$

حيث

n = معامل خشونة Manning ($\frac{T}{L^{1/3}}$ ، حيث T الزمن المعتبر).

R = نصف القطر الهيدروليكي (L).

S = الضـــياع في الارتفاع الناتج عن الاحتكاك لكل واحدة الطول للقناة (رقم لا بعدي).

= انحدار أو ميل تدرج الطاقة.

وتكون من أجل النماذج الحقيقية قيمة $S_r = 1$ و $R_r = L_r$، وبالتالي:

$$V_r=\frac{L_r^{2/3}}{n_r}$$

إن من الضروري أن يكون الجريان في نماذج الأنهار والأقنية مضطرباً، ولقد حددت محطة تجارب المجاري المائية الأمريكية (U.S Waterways Experiment Station) بأن الجريان يكون مضطرباً إذا تحققت العلاقة:

$$\frac{VR}{\nu}\geq 4000$$

حيث

V = السرعة الوسطية، ft/s (m/s).

R = نصف القطر الهيدروليكي، ft (m).

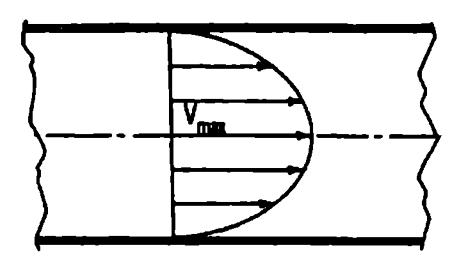
ν = اللزوجة الحركية، ft^2/s (m^2/s).

إذا أردنـــا أن نقـــرّب النموذج من النموذج الحقيقي فإنه يجب جعله كبير الحجم وذلك للتعبير عن الجريان المضطرب، ولكن يعتبر هذا النموذج غير اقتصادي.

جريان المائع في الأنابيب

الجريان الصفحي

تتحــرك جــزيئات المائع في الجريان الصفحي وفق طبقات متوازية باتجاه واحد. ويأخذ توزع السرعة في الجريان الصفحي شكل قطع مكافئ - كما يبينه الشكل 10.3 - ممـا يخلق إجهادات قص تعطى بالعلاقة $\tau = \mu\ dV/dy$ حيث يمثل dV/dy نسبة تغير السرعة وفق العمق، ويمثل μ معامل اللزوجة. وكلما ازدادت إجهادات القــص هــذه كلمــا أصبحت قوى اللزوجة أقل قدرة على تخميد الاضطرابات، وبالتالي سيصبح الجريان بالنتيجة جرياناً مضطرباً. تعتمد منطقة التغير (أو التبدل) على سرعة المائع وكثافته ولزوجته وعلى حجم القناة.



الشكل 10.3 توزع السرعة لجريان صفحي في أنبوب دائري يكون على شكل قطع مكافئ، وتكون القيمة العظمى للسرعة مساوية لضعف السرعة الوسطية

ولقــد تمّ إيجــاد وسيط لا بعدي يدعى رقم رينولدز (Reynolds number) ليكون معياراً يحدد نوع الجريان هل هو صفحي أم مضطرب، ويمثل هذا الرقم نسبة قوى العطالة إلى قوى اللزوجة ويعطى بالعلاقة:

$$R = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

حيث

V – سرعة المائع، ft/s (m/s).

D – قطر الأنبوب، ft (m).

ρ – كثافة المائع، ($Kg.s^2/m^4$) $lb.s^2/ft^4$ (وهو الوزن النوعي مقسماً على g، $32.2\ ft/s^2$).

μ – لزوجة المائع، ($Kg.s/m^2$) $lb.s/ft^2$.

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – اللزوجة الحركية، ft^2/s (m^2/s).

وإذا كــــان رقـــم رينولدز أقل من 2000 فهذا يعني بأن الجريان هو صفحي ضمن الأنابـــيب الدائـــرية. وإذا كان رقم رينولدز أكبر من 2000 فإنه يعني بأن الجريان الصفحي غير مستقر، ومن المحتمل أن تكبر الاضطرابات جاعلةً الجريان مضطرباً.

يمكــــن استنتاج المعادلة التالية في الجريان الصفحي والتي تعطى ضياعات الارتفاع الـــناتجة عـــن الاحتكاك عبر الافتراض بأن القوى ستؤثر على اسطوانة من المائع موجودة داخل الأنبوب:

$$h_f = \frac{32\mu LV}{D^2 \rho g} = \frac{32\mu LV}{D^2 w}$$

حيث

h_f – ضياعات الارتفاع الناتجة عن الاحتكاك، ft (m).

L – طول مقطع الأنبوب المأخوذ بعين الاعتبار، ft (m).

g – تسارع الجاذبية الأرضية – ($9.81\ m/s^2$) $32.2\ ft/s^2$.

W – الوزن النوعي للمائع، (Kg/m^3) lb/ft^3.

ونستطيع كتابة المعادلة السابقة بعد إدخال رقم رينولدز كما يلي:

$$h_f = \frac{64}{R}\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

تشابه هذه المعادلة في الجريان الصفحي معادلة Darcy - Weisbach، وذلك لأنه في الجريان الصفحي يعطى الاحتكاك بالعلاقة:

$$f = 64/R$$

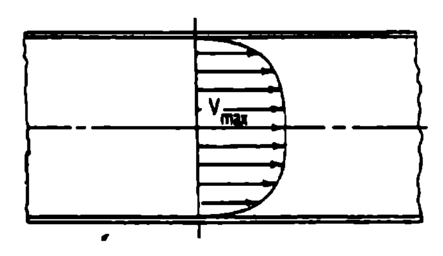
الجريان المضطرب

تكون قوى العطالة كبيرة جداً في الجريان المضطرب بحيث لا تستطيع قوى اللزوجة تخميد الاضطرابات الناتجة أصلاً عن خشونة السطح. وينشأ عن هذه الاضطرابات دوامـــات والـــتي لهـــا سرعتين دورانية وانسحابية (انتقالية). ويؤدي انتقال هذه الدوامات إلى مزج وتبادل كميات من المائع خلال مقاطع المجرى وتتوزع السرعة نتـــيجة لذلك بشكل أكثر انتظاماً – كما يبينه الشكل 10.4 –، وتظهر التجارب المجراة على الجريان المضطرب ما يلي:

- تتناسب ضياعات الارتفاع بشكل طردي مع طول الأنبوب.
- تتناسب ضياعات الارتفاع تقريباً مع مربع السرعة.
- تتناسب ضياعات الارتفاع تقريباً بشكل عكسي مع القطر.
- تعتمد ضياعات الارتفاع على خشونة سطح جدار الأنبوب.
- تعتمد ضياعات الارتفاع على كثافة المائع ولزوجته.
- تكون ضياعات الارتفاع مستقلة عن الضغط.

معادلة Darcy-Weisbach

تعتبر هذه المعادلة إحدى أهم المعادلات المستخدمة أثناء حساب الجريان داخل الأنبوب، حيث تحدد هذه المعادلة الحالات المشروحة في الفقرة السابقة وتطبق بشكل مقبول على الجريان الصفحي أو المضطرب ولجميع الموائع.



الشكل 10.4 يكون توزع السرعة لجريان مضطرب في انبوب دائري بشكل منتظم تقريباً أكثر من السرعة في حالة الجريان الصفحي

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

حيث

h_f – ضياع الارتفاع الناتج عن الاحتكاك، ft (m).

f – عامل الاحتكاك (يمكن إيجاده في المراجع الهندسية).

L – طول الأنبوب، ft (m).

D – قطر الأنبوب، ft (m).

V – سرعة المائع، ft/s (m/s).

g – تسارع الجاذبية الأرضية – $32.2\ ft/s^2\ (9.81\ m/s^2)$.

تستطيع استخدام مخطط Moody لإيجاد قيمة معامل الاحتكاك f.

وبما أن المعادلة السابقة هي معادلة متجانسة بعدياً فإنه يمكن استخدام أي مجموعة والـــواحدات بدون أن يغير ذلك من قيمة معامل الاحتكاك، ونستطيع إيجاد قيم الخشـــونة ∈، ft (m) في المراجع الهندسية، وذلك لأننا سنحتاج إليها عند استخدام مخطط Moody لتحديد معامل الاحتكاك وفق معادلة Darcy-Weisback.

معادلة Chezy

تم وضـــع هـــذه المعادلة لتقوم بحساب ضياعات الارتفاع في مجاري الموائع، وهي تعطي نتائج جيدة في الحالة التي تكون فيها أرقام رينولدز مرتفعة:

$$V = C\sqrt{RS}$$

حيث

V = السرعة، ft/s (m/s).

C = معامل يتعلق بخشونة سطح المجرى.

S = مـــيل مستقيم تدرج الطاقة أو ضياعات الارتفاع الناتجة عن الاحتكاك (من المجرى (m/m) من مجرى ft/ft.

R = نصف القطر الهيدروليكي، ft (m).

يحسب نصف القطر الهيدروليكي لمجرى ما عبر تقسيم مساحة مقطع المجرى المار فيه المائع على محيط المقطع المبتل.

معادلة Manning (معادلة التزويد)

لقـــد أثبتت التجارب أن معادلة Manning تتضمن القيمة C في معادلة Chezy التي يجب أن تتغير مع $R^{1/6}$ كما يلي:

$$C = \frac{1.486 R^{1/6}}{n}$$

حيث

n = معامـــل يتعلق بخشونة السطح (يعتمد أيضاً على خشونة السطح، ويعامل n أحياناً على أنه وسيط مركزي لجميع ضياعات الارتفاع). وبالتبديل نجد:

$$V = \frac{1.486}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

وبـــتعويض D/4 – حـــيث D يمثل قطر الأنبوب – في نصف القطر الهيدروليكي للأنبوب يمكننا كتابة المعادلات التالية المعبّرة عن التدفق الكامل ضمن الأنابيب:

$$V = \frac{0.590}{n} D^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = \frac{0.463}{n} D^{8/3} S^{1/2}$$

$$h_f = 4.66 n^2 \frac{L Q^2}{D^{16/3}}$$

$$D = \left(\frac{2.159 Q n}{S^{1/2}} \right)^{3/8}$$

حيث

Q = التدفق الحجمي، ft^3/s (m^3/s).

معادلة Hazen-Williams

تعتـــبر هذه المعادلة من أشهر المعادلات المستخدمة في حسابات تدفق الماء ضمن الأنابيب، كما أنها صالحة لحالة القنوات المفتوحة أو التدفق ضمن الأنابيب:

$$V = 1.318\, C_1\, R^{0.63}\, S^{0.54}$$

ومن أجل التدفق الكامل ضمن الأنابيب:

$$V = 0.55\, C_1\, D^{0.63}\, S^{0.54}$$

$$Q = 0.432\, C_1\, D^{2.63}\, S^{0.54}$$

$$h_f = \frac{4.727}{D^{4.87}} L \left(\frac{Q}{C_1}\right)^{1.85}$$

$$D = \frac{1.376}{S^{0.205}} \left(\frac{Q}{C_1}\right)^{0.38}$$

حيث

V = السرعة، ft/s (m/s).

C_1 = معامل يتعلق بخشونة السطح (يعطى في المراجع الهندسية).

R = نصف القطر الهيدروليكي، ft (m).

S = ضياع الارتفاع الناتج عن الاحتكاك، (من الأنبوب m/m) من الأنبوب ft/ft.

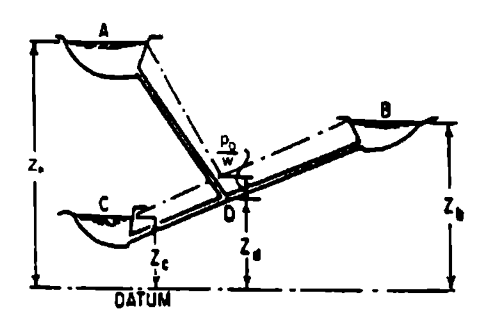
D = قطر الأنبوب، ft (m).

L = طول الأنبوب، ft (m).

Q = التصريف، ft^3/s (m^3/s).

h_f = ضياعات الاحتكاك، ft (m).

يظهر الشكل 10.5 مسألة نموذجية لثلاثة خزانات، وارتفاعات خطوط التدرج الهيدروليكي للأنابيب الثلاثة متساوية عند النقطة D. ويمكن كتابة معادلة Hazen-Williams لضياع الارتفاع لكل أنبوب متلاقي عند النقطة D. وبتطبيق معادلة الاستمرارية لكميات التدفق نستطيع إيجاد عدد معادلات بعدد المجاهيل كما يلي:



الشكل 10.5 التدفق بين الخزانات

$$Z_a = Z_d + \frac{P_D}{w} + \frac{4.727 L_A}{D_A^{4.87}}\left(\frac{Q_A}{C_A}\right)^{1.85}$$

$$Z_b = Z_d + \frac{P_D}{w} + \frac{4.727 L_B}{D_B^{4.87}}\left(\frac{Q_B}{C_B}\right)^{1.85}$$

$$Z_c = Z_d + \frac{P_D}{w} + \frac{4.727 L_C}{D_C^{4.87}}\left(\frac{Q_C}{C_C}\right)^{1.85}$$

$$Q_A + Q_B = Q_C$$

حيث

P_D = الضغط عند النقطة D.

w = واحدة الوزن من السائل.

تغيرات الضغط (الارتفاع) الناتجة عن تغير حجم الأنبوب

تحدث ضياعات القدرة في نقاصات الأنابيب والانحناء والموسعات والصمامات وباقي لوازم الأنابيب. وفي الحقيقة يمكن إهمال هذه الضياعات إذا كان طول

الأنبوب أكبر من 1500 مرة من قطر الأنبوب، أما في الأنابيب القصيرة الطول فقد تــؤدي هــذه الضياعات إلى زيادة ضياعات الاحتكاك وبالتالي يجب أخذها بعين الاعتبار.

التوسيع المفاجئ

لقد تمّ تحديد المعادلة التالية تحليلياً والتي تستخدم لحساب ضياعات الارتفاع – (m) ft – أثــناء مــرور المائع ضمن الموسعات المفاجئة، والتي تعطي نتائج تتوافق مع النتائج العملية:

$$h_L = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

حيث

V_1 – السرعة قبل التوسع المفاجئ في المقطع ft/s (m/s).

V_2 – السرعة بعد التوسع المفاجئ في المقطع ft/s (m/s).

g – ($9.81\ m/s^2$) $32.2\ ft/s^2$.

ولقــد قــدّم العالم Arches معادلةً أخرى لحساب ضياعات الارتفاع الناتجة عن التوسيع المفاجئ للأنبوب، وتعطي هذه المعادلة نتائج أقرب بقليل من النتائج العملية من المعادلة السابقة:

$$h_L = \frac{1.1(V_1 - V_2)^{1.92}}{2g}$$

التوسيع المتدرج (الموسعات المتدرجة)

تأخذ معادلة ضياع الارتفاع الناتج عن التوسيع المخروطي المتدرج للأنبوب الشكل التالي:

$$h_L = \frac{K(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

حيث

K = معامل الضياع والذي يؤخذ من المراجع الهندسية.

التضييق المفاجئ لحجم الأنبوب (التقليص المفاجئ للمقطع)

لقـــد تمّ تحديد المعادلة التالية لحساب ضياع الارتفاع الناتج عن التقليص المفاجئ للأنبوب وفق نفس نوع الدراسات التحليلية السابقة:

$$h_L = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 \frac{V^2}{2g}$$

حيث

C_c = معامل الرص.

V = السرعة ضمن القطر الأصغر للأنبوب، ft/s (m/s).

وتعطي هذه المعادلة نتائجاً أفضل إذا كان ضياع الارتفاع أكبر من 1 ft (0.3 m).

ولقد قام Brightmore بوضع معادلة تجريبية أخرى لحساب ضياع الارتفاع الناتج عن التقليص المفاجئ للأنبوب والتي لها الشكل التالي:

$$h_L = \frac{0.7(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

تعطي هذه المعادلة نتائجاً أدق إذا كان ضياع الارتفاع أقل من 1 ft (0.3 m).

تعتـــبر ضياعات الدخول للأنابيب أحد الحالات الخاصة للتقلص المفاجئ، وتقترح بعض المراجع الهندسية قيمة نموذجية لمعامل الضياع K الناتج عن دخول المائع إلى الأنبوب كما يلي:

$$h_L = K\ V^2/2g$$

حيث

V = السرعة ضمن الأنبوب.

ضياعات الانحناء واللوازم القياسية

تعطى ضياعات الارتفاع الناتجة عن الانحناءات وعن لوازم الأنابيب مثل الصمامات والأكواع بالعلاقة التالية:

$$h_L = \frac{KV^2}{2g}$$

وللحصـــول على الضياعات في الانحناءات المغايرة لقيمة 90°، فإنه يمكن استخدام المعادلة التالية لتعديل قيمة K كما يلي:

$$K' = K\sqrt{\frac{\Delta}{90}}$$

حيث

Δ = زاوية الانحناء بالدرجات، وتعطى قيم K في المراجع الهندسية.

التدفق خلال النوافير

النافورة هي فتحة بمحيط مغلق يتدفق من خلالها الماء، ويمكن أن تأخذ النوافير أي شكل، إلا أنها عادةً ما تكون مدورة أو مربعة أو مستطيلة الشكل.

تصريف نافورة إلى الهواء الحر

يمكن حساب التصريف المار من نافورة حادة الحواف بالعلاقة:

$$Q = Ca\sqrt{2gh}$$

حيث

Q = التصريف (التدفق المصرَّف)، ft^3/s (m^3/s).

C = معامل التصريف.

a = مساحة النافورة، ft^2 (m^2).

g = تسارع الجاذبية الأرضية، ft/s^2 (m/s^2).

h = ارتفاع الماء فوق الخط الأفقي المار بمركز النافورة، ft (m).

يعطى معامل التصريف C في المراجع الهندسية من أجل السرعات المنخفضة، أما إذا كانت السرعة كبيرة فيجب أخذ تأثيره بعين الاعتبار. كما أن قياس الارتفاع اعتباراً من خط المركز للنافورة ليس صحيحاً نظرياً في حالة الارتفاعات الصغيرة، ولكنه يتم تصحيح هذا الخطأ عبر اختيار قيم C.

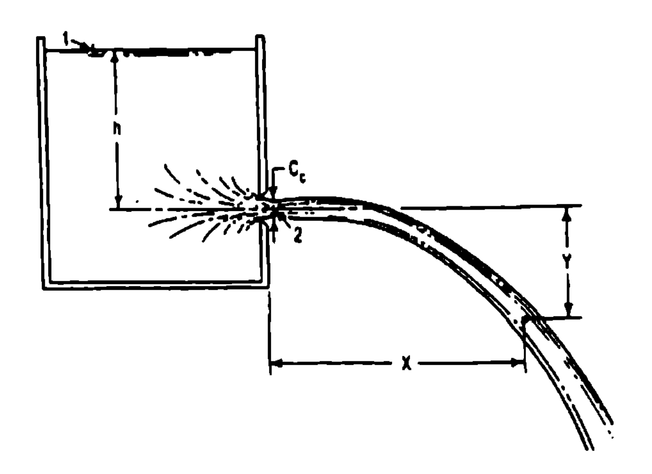
يعتبر معامل التصريف C عبارة عن حاصل ضرب معامل السرعة C_v بمعامل الرص C_c، ونحصل على معامل السرعة عبر تقسيم السرعة الحقيقية عند عنق النافورة (تقلص التصريف النافث) على السرعة النظرية. ونحصل على السرعة النظرية عبر كتابة معادلة برنولي بين النقطتين 1 و2 من الشكل 10.6:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{w} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{w} + z_2$$

وبأخذ المستوي المرجعي المار من النقطة 2 يمكننا تعويض: $Z_1 = h$، $V_1 = 0$، $P_1/w = P_2/w = 0$ و$Z_2 = 0$، في المعادلة السابقة فنحصل على:

$$V_2 = \sqrt{2gh}$$

ونحصـــل على معامل الرص C_c عبر الحصول على النسبة بين أصغر مساحة للمائع المنفوث - عنق النافورة - إلى مساحة النافورة. يحدث الرص في المائع المنفوث إذا كانـــت حواف النافورة عبارة عن مربع، مما يجبر جزء من المائع على الاقتراب من النافورة وفق اتجاه معامد لاتجاه التدفق خلال النافورة.



الشكل 10.6 يأخذ المائع المنفوث مساراً على شكل قطع مكافئ

النوافير المغمورة بالماء

يمكن حساب التدفق خلال النوافير المغمورة عبر تطبيق معادلة برنولي بين النقطتين 1 و2 في الشكل 10.7 والحصول على العلاقة:

$$V_2 = \sqrt{2g\left(h_1 - h_2 + \frac{V_1^2}{2g} - h_L\right)}$$

حيث

h_L = الضياعات في الارتفاع بين النقطتين 1 و2، ft (m).

وبفرض $V_1 \approx 0$ ووضع $h_1 - h_2 = \Delta h$، واستخدام معامل التصريف C في حساب الضياعات نحصل على المعادلة التالية:

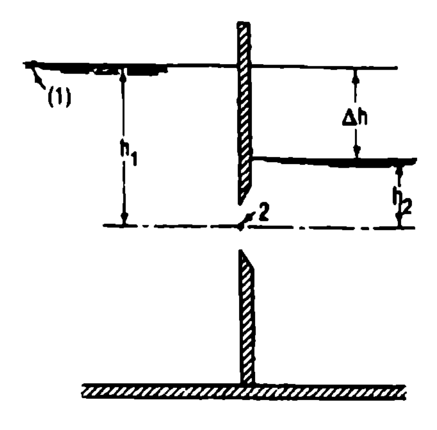
$$Q = Ca\sqrt{2g\,\Delta h}$$

لا تختلف قيم المعامل C للنوافير المغمورة كثيراً عن قيمة للنوافير غير المغمورة.

معدل التصريف تحت ارتفاع هابط

تولد عملية التدفق من خزان أو وعاء عندما يكون التدفق الداخل أصغر من التدفق الخارج حالة التصريف تحت ارتفاع هابط. ويمكن حساب الزمن المطلوب لتدفق كمية محددة من الماء في خزان عبر مساواة حجم الماء المتدفق خلال الفوهة أو الأنبوب خلال زمن dt مع مقدار تناقص حجم الماء في الخزان. وإذا كانت مساحة الخزان ثابتة فإنه يمكننا كتابة:

$$t = \frac{2A}{Ca\sqrt{2g}}(\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2})$$



الشكل 10.7 التصريف خلال نافورة مغمورة

حيث

h_1 = الارتفاع عند بداية التصريف، ft (m).

h_2 = الارتفاع عند نهاية التصريف، ft (m).

t = الزمن المستغرق لانخفاض الارتفاع من h_1 إلى h_2، s.

نفث الموائع

بما أن تأثير مقاومة الهواء يعتبر صغيراً على حركة المائع فإن تصريف المائع خلال نافورة إلى الهواء سيأخذ مساراً على شكل قطع مكافئ. وتعطى السرعة الابتدائية للنفث بالعلاقة:

$$V_0 = C_v\sqrt{2gh}$$

حيث

h = الارتفاع فوق الخط المركزي للنافورة، ft (m).

C_v = معامل السرعة.

يعتمد اتجاه السرعة الابتدائية على توضع السطح الحامل للنافورة، وللتبسيط تمّ الحصول على المعادلات التالية بافتراض أن النافورة واقعة في مستوي شاقولي (انظر الشكل 10.6). تبقى سرعة المائع المنفوث وفق الاتجاه (الأفقي) X ثابتة:

$$V_x = V_0 = C_v\sqrt{2gh}$$

تأخذ السرعة وفق الاتجاه Y قيمة ابتدائية مساوية للصفر، ثم تصبح تابعةً للزمن ولتسارع الجاذبية الأرضية:

$$V_y = gt$$

ويعطى الإحداثي X عند الزمن t بالعلاقة:

$$X = V_x t = tC_v\sqrt{2gh}$$

بينما يعطى الإحداثي Y بالعلاقة:

$$Y = V_{avg}t = \frac{gt^2}{2}$$

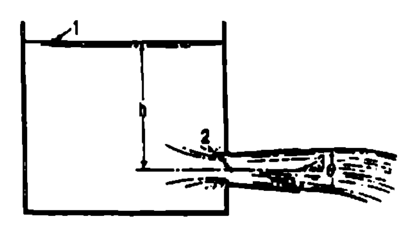
حيث

V_{avg} = السرعة المتوسطة خلال فترة من الزمن t. وتعطى معادلة المسار بالعلاقة:

$$X^2 = C_v^2 4hY$$

تصريف النافورة إلى الأنابيب المخروطية المتباعدة

يستطيع هذا النوع من الأنابيب زيادة التدفق عبر النافورة بشكل كبير عبر تخفيض الضغط عند النافورة إلى ما دون الضغط الجوي. ونحصل على الضغط عند مدخل الأنــــبوب عبر تطبيق معادلة برنولي بين النقطتين 1 و3 والنقطتين 1 و2 في الشكل التالي:



الشكل 10.8 يزيد الأنبوب المخروطي المتباعد التدفق من خزان عبر نافورة عبر تخفيض الضغط إلى ما دون الضغط الجوي

$$p_2 = wh\left[1 - \left(\frac{a_3}{a_2}\right)^2\right]$$

حيث

P_2 = الضغط المقاس عند مدخل الأنبوب، lb/ft^2 (Pa).

w = وحدة الوزن للماء (الكتلة الحجمية للماء)، lb/ft^3 (Kg/m^3).

h = الارتفاع عند المحور المركزي للنافورة، ft (m).

a_2 = مساحة أصغر مقطع من الماء المنفوث (عنق الفوهة إن كان موجوداً)، ft^2 (m^2)، a_3 = مساحة التصريف عند نهاية الأنبوب، ft^2(m^2). ويحسب معدّل التصريف أيضاً عبر كتابة معادلة برنولي بين النقطتين 1 و3 في الشكل 10.8.

وحتى يكون هذا التحليل مقبولاً يجب أن يكون الأنبوب تام التدفق، ويجب أن لا ينخفض الضغط عند مقدمة الأنبوب ليصل إلى ضغط تبخر الماء، تظهر تجارب العالم Venturi بأن قيمة الزاوية θ الأكثر فعالية تكون حوالي 5°.

طرق الماء

طرق الماء هو عبارة عن تغير في الضغط – إما أعلى أو أخفض من الضغط الطبيعي – ناتج عن التغير في معدّل التدفق داخل الأنبوب.

تعطى معادلة سرعة الماء ضمن الأنبوب كما يلي:

$$U = \sqrt{\frac{E}{\rho}}\sqrt{\frac{1}{1 + ED/E_p t}}$$

حيث

U = سرعة موجة الضغط داخل الأنبوب، ft/s (m/s).

E = معامل المرونة للماء = 43.2×10^6 lb/ft^2 (2.07×10^6 kPa).

ρ = كثافة الماء = 1.94 lb.s/ft^4 (الوزن النوعي مقسوماً على تسارع الجاذبية الأرضية).

D = قطر الأنبوب، ft (m).

E_p = معامل المرونة لمعدن الأنبوب، lb/ft^2 (Kg/m^2).

t = سماكة جدار الأنبوب، ft (m).

إجهادات الأنبوب العمودية على المحور الطولي

تنتج الإجهادات المؤثرة عمودياً على المحور الطولي للأنبوب عن الضغط الداخلي أو الخارجي على سطوح الأنبوب. يُولّد الضغط الداخلي إجهاداً يدعى الشد الحلقي (hoop tension)، والتي يمكن حسابه عبر أخذ مخطط الجسم الحر لطول (25.4 mm) 1 in من الأنبوب مقطوعاً بمستوي عمودي على المحور الطولي (الشكل 10.9). تلغى القوى وفق المحور الشاقولي، ويعطي مجموع القوى وفق المحور الأفقي بالعلاقة:

$$pD = 2F$$

حيث

p = الضغط الداخلي، lb/in^2 (MPa).

D = القطر الخارجي للأنبوب، in (mm).

F = القوة المؤثرة على كل مقطع من حافة الأنبوب، lb (N).

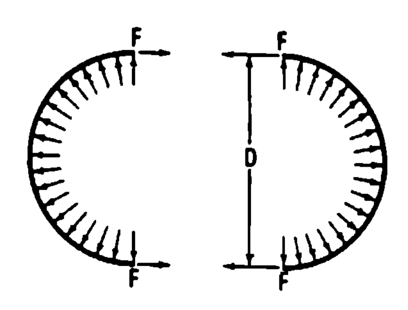
وبالتالي يعطى الإجهاد في مادة الأنبوب، lb/in^2 (MPa) بالعلاقة:

$$f = \frac{F}{A} = \frac{pD}{2t}$$

حيث

A = مساحة مقطع حافة الأنبوب، ft^2 (m^2).

t - سماكة جدار الأنبوب، in (mm).



الشكل 10.9 يولّد ضغط الأنبوب الداخلي شداً حلقياً

التمدد الحراري للأنبوب

إذا تعـــرّض الأنبوب لمجال واسع من درجات الحرارة، فإن الإجهاد الناتج عن تغير درجات الحرارة يعطى بالعلاقة:

$$f = cE\,\Delta T$$

حيث

E - معامل المرونة لمعدن الأنبوب، lb/in^2 (MPa).

ΔT - تغير درجات الحرارة عن درجة حرارة الإنشاء.

C - معامل التمدد الحراري لمعدن الأنبوب.

وتعطى الحركة الواجب السماح بها - إذا تم استخدام وصلات تمدد - بالعلاقة:

$$\Delta L = Lc\,\Delta T$$

حيث

ΔL = الحركة وفق الطول L من الأنبوب.

L = المسافة بين وصلتي تمدد.

القوى الناتجة عن انحناءات الأنبوب

إن مــن الشائع عملياً استخدام كتل دفع في انحناءات الأنبوب لأخذ القوى المؤثرة على الأنبوب الناتجة عن تغير كمية الحركة وضغط الماء الداخلي غير المتوازن.

يعــبر الشــكل 10.10 عن طريقة ملائمة لإيجاد القوة المحصلة المؤثرة على الانحناء، ويمكن تحليل القوى إلى مركبتين X و Y لإيجاد طويلة واتجاه القوى المحصلة المؤثرة على الأنبوب، ونجد في الشكل 10.10 ما يلي:

V_1 = السرعة قبل تغير حجم الأنبوب، ft/s (m/s).

V_2 = السرعة بعد تغير حجم الأنبوب، ft/s (m/s).

p_1 = الضغط قبل الانحناء أو تغير حجم الأنبوب، lb/ft^2 (kPa).

p_2 = الضغط بعد الانحناء أو تغير حجم الأنبوب، lb/ft^2 (kPa).

A_1 = المساحة قبل تغير حجم الأنبوب، ft^2 (m^2).

A_2 = المساحة بعد تغير حجم الأنبوب، ft^2 (m^2).

F_{2m} = القوة الناتجة عن كمية الحركة للماء في المقطع 2 = $V_2\,Qw/g$.

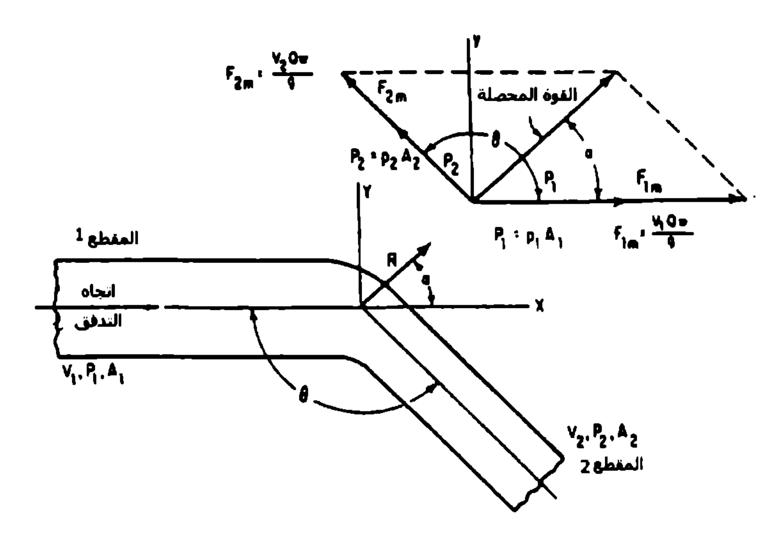
F_{1m} = القوة الناتجة عن كمية الحركة للماء في المقطع 1 = $V_1\,Qw/g$.

P_2 = ضغط الماء في المقطع 2 مضروباً بمساحة المقطع 2 = $p_2\,A_2$.

P_1 = ضغط الماء في المقطع 1 مضروباً بمساحة المقطع 1 = $p_1\,A_1$.

w – وزن الوحدة للسائل، lb/ft^3 (Kg/m^3).

Q – التدفق (معدل التصريف)، ft^3/s (m^3/s).



الشكل 10.10 القوى الناتجة عن التدفق ضمن انبوب منحني ومتغير القطر

إذا كـــان ضياع الضغط مهملاً وليس هناك تغير في طويلة السرعة حول الانحناء، فإنه يمكننا تطبيق الحل السريع التالي:

$$R = 2A\left(w\frac{V^2}{g} + p\right)\cos\frac{\theta}{2}$$

$$\alpha = \frac{\theta}{2}$$

حيث

R = القوة المحصلة المؤثرة على الانحناء، lb (N).

α = الزاوية التي تصنعها المحصلة مع القوة F_{1m}.

P = الضغط، lb/ft^2 (kPa).

w = وزن الوحدة للماء = $62.4\ lb/ft^3$ ($998.4\ Kg/m^3$).

V = سرعة الجريان، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية الأرضية = $32.2\ ft/s^2$ ($9.81\ m/s^2$).

A = مساحة مقطع الأنبوب، ft^2 (m^2).

θ = الزاوية بين طرفي الأنبوب ($0° \le \theta \le 180°$).

الحجم الاقتصادي للأنابيب الموزعة

توجد هناك معادلة لإعطاء قطر الأنبوب الأكثر اقتصادية لنظام توزيع أنابيب المياه وهي:

$$D = 0.215\left(\frac{fbQ_a^3 S}{aiH_a}\right)^{1/7}$$

حيث

D = قطر الأنبوب، ft (m).

f = عامل احتكاك Darcy-Weisbach.

b = سعر الطاقة (القدرة)، (خلال سنة \$/KW) خلال سنة \$/hp.

Q_a = متوسط معدّل التصريف، ft^3/s (m^3/s).

S – الإجهاد المسموح به لمعدن الأنبوب، lb/in^2 (MPa).

i – تكلفة الاصلاح لخط الأنابيب سنوياً (معبّراً عنه كجزء من الكلفة الكلية).

H_a – متوسط الارتفاع (الضغط) المطبّق على الأنبوب، ft (m).

تحديد القطر المناسب لأنابيب الماء والبخار

تعتبر حسابات ضياعات المائع ضرورية لتحديد الحجم الدقيق للأنبوب. ولذلك تعتبر هذه نقطة البداية لتصميم أي نظام أنابيب سواءً أكان لسائل أو غاز. وعادة ما يكون إبقاء السرعة أعلى ما يمكن أمراً أكثر اقتصادية لأنها تنتج ضياعات أقل، وسيعطي الحجم الأمثل للأنبوب مصاريف سنوية صغرى مثل كلفة الضخ مضافاً لها كلفة الإنشاء الأساسية.

ننصحك بأن تأخذ قيمة السرعة من الجدول التالي والذي يعتمد على التطبيق المراد تمديد الأنابيب له، ولكن تذكر بأنها ستكون قيماً تقريبية فقط وتحتاج إلى إعادة تقييم بعد إنجاز حساباتك حتى تصل إلى الحجم الاقتصادي.

مجال الخدمة	مجال السرعة ft/s	m/s
أنابيب الخدمة المائية الرئيسية	2 to 5	0.61 to 1.5
أنابيب مياه الخدمة العامة	4 to 10	1.2 to 3.1
أنابيب مياه تغذية المرجل	6 to 18	1.8 to 5.5
أنابيب البخار الساخن منخفض الضغط.	15 to 70	4.6 to 21.3
أنابيب بخار رئيسية بضغط منخفض	70 to 165	21.3 to 50.3
أنابيب بخار رئيسية بضغط عال	165 to 400	50.3 to 121.9
أنابيب المضخات والمحرك البخاري	100 to 150	30.5 to 45.7
أنابيب العنفة البخارية	150 to 330	45.7 to 100.6

تزداد السرعة المسموح بها نوعاً ما مع زيادة قطر الأنبوب، لذلك أعد التحقق من قيم السرعة V نتيجة المعادلات التالية مستخدماً قطر الأنبوب d:

خطوط تصريف المضخة, ft/s $\quad V = (d/2) + 4$

خطوط سحب المضخة, ft/s $\quad V = 1/3\,(d/2) + 4$

أنابيب البخار, 1000 ft/min $\quad V = d$

وباستخدام قيمة السرعة التقريبية احسب حجم الأنبوب من المعادلة:

$$ID\ of\ pipe = \sqrt{\frac{0.409 \times gal/\min}{velocity,\ ft/s}}$$

حساب التدفق عبر القياس بالفنتوري

يعطى التدفق المار خلال الفنتوري (الشكل 10.11) بالعلاقة التالية:

$$Q = cKd_2^2\sqrt{h_1 - h_2}$$

$$K = \frac{4}{\pi}\sqrt{\frac{2g}{1-(d_2/d_1)^2}}$$

حيث

Q = معدّل التدفق، ft^3/s (m^3/s).

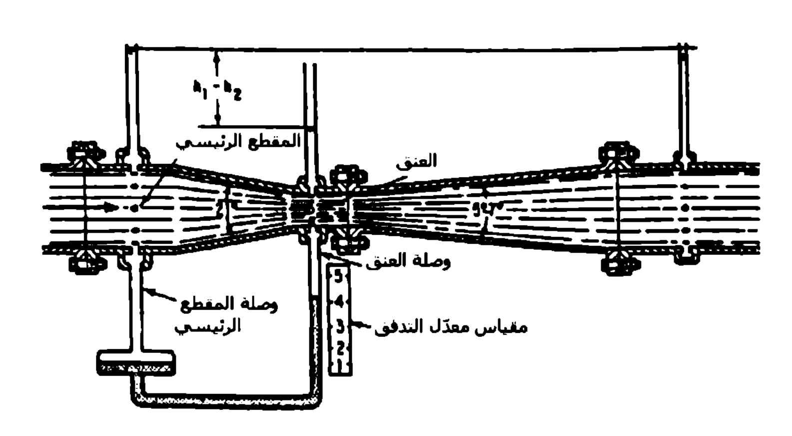
c = معامل تصريف تجريبي يتعلق بالسرعة عند العنق وبالقطر.

d_1 = قطر المقطع الرئيسي، ft (m).

d_2 = قطر العنق، ft (m).

h_1 = الضغط عند المقطع الرئيسي، ft (m) عمود ماء.

h_2 = الضغط عند مقطع العنق، ft (m) عمود ماء.



الشكل 10.11 مقياس فنتوري القياسي

الجريان غير المنتظم في الأقنية المفتوحة

سنستخدم الرموز التالية في هذا الفصل:

V = سرعة التدفق في القناة المفتوحة، ft/s (m/s).

D_c = العمق الحرج، ft (m).

g = تسارع الجاذبية الأرضية، ft/s^2 (m/s^2).

Q = معدّل التدفق، ft^3/s (m^3/s).

q = معدّل التدفق لكل واحدة عرض، ft^3/ft (m^3/m).

H_m = القدرة النوعية الصغرى، ft.lb/lb (Kg.m/Kg).

وتعطى أبعاد القناة بالأقدام أو الأمتار، كما تمّ إعطاء الرموز الموافقة لتلك الأبعاد وشرحها من خلال النص.

يحدث التدفق غير المنتظم في الأقنية المفتوحة عندما يتم تغيير مساحة مقطع الجريان بشكل متدرج أو مفاجئ، ولقد أُستخدم المصطلحان التدفق متدرج التغير والتدفق سريع التغير لوصف هذين النوعين من الجريان غير المنتظم، وسنقدم المعادلات التالية للتعبير عن التدفق في حال كون:

(1) إذا كان مقطع القناة مستطيل الشكل.

(2) إذا كان مقطع القناة مثلث الشكل.

(3) إذا كان مقطع القناة على شكل قطع مكافئ.

(4) إذا كان مقطع القناة على شكل شبه منحرف.

(5) إذا كان مقطع القناة دائري الشكل.

تغطي هذه الأنواع الخمسة معظم أنواع الأقنية التي تشاهد في الحياة العملية، ويظهر الشكل 10.12 علاقات القدرة العامة للجريان ضمن الأقنية المفتوحة.

الأقنية مستطيلة المقطع

يساوي العمق الحرج D_c في الأقنية مستطيلة المقطع العمق الوسطي D_m، ويساوي عرض قعر القناة b العرض العلوي T، وعندما يؤخذ تصريف السائل كتدفق لكل قدم (متر) من عرض القناة q، فإن b و T لهما نفس الواحدة. عندها يمكن حساب السرعة المتوسطة V_c بالعلاقة:

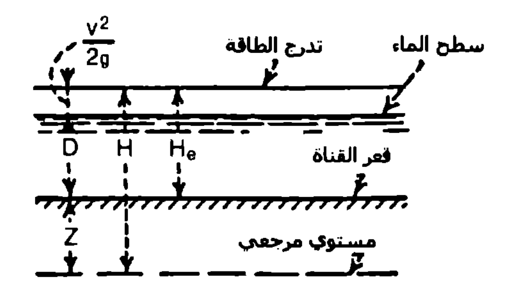
$$V_c = \sqrt{gD_c}$$

و

$$D_c = \frac{V_c^2}{g}$$

أيضاً

$$Q = \sqrt{g} b D_c^{3/2}$$



الشكل 10.12 طاقة جريان السائل ضمن القناة المفتوحة

حيث

g يعبر عن تسارع الجاذبية الأرضية بنظام الواحدات الدولية SI أو بنظام USCS.

$$q = \sqrt{g} D_c^{3/2}$$

و

$$D_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

وتعطى القدرة النوعية الصغرى بالعلاقة:

$$H_m = \frac{3}{2} D_c$$

ويعطى العمق الحرج بالعلاقة:

$$D_c = 2/3 \, H_m$$

عندها يمكن إعطاء معدّل التصريف لكل قدم (متر) من العرض بالعلاقة:

$$q = \sqrt{g}(2/3)^{3/2} H_m^{3/2}$$

وبتعويض قيمة g = 32.16 تصبح المعادلة السابقة كما يلي:

$$q = 3.087 H_m^{3/2}$$

الأقنية مثلثة المقطع

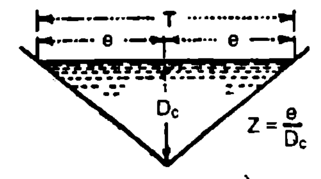
إذا كان العمق الأعظمي D_c فإن العمق الوسطي D_m في الأقنية مثلثة المقطع (الشكل 10.13) يساوي إلى نصف العمق الأعظمي $D_m = \frac{1}{2} D_c$، عندها:

$$V_c = \sqrt{\frac{g D_c}{2}}$$

و

$$D_c = \frac{2V_c^2}{g}$$

وكما هو واضح في الشكل 10.13 فإن z تمثل ميل جداري القناة معبراً عنه بالنسبة بين البعد الأفقي إلى البعد الشاقولي، وإذا كان المقطع متناظراً فإنه $z = e/D_c$ وتعطى المساحة بالعلاقة $a = zD_c^2$ وعندها:



الشكل 10.13 القناة المفتوحة مثلثة المقطع

$$Q = \sqrt{\frac{g}{2}} z D_c^{5/2}$$

وبتعويض g = 32.16

$$Q = 4.01 z D_c^{5/2}$$

و

$$D_c = \sqrt{\frac{2Q^2}{gz^2}}$$

أو

$$Q = \sqrt[5]{\frac{g}{2}} \left(\frac{4}{5}\right)^{5/2} z H_m^{5/2}$$

وبتعويض g = 32.16

$$Q = 2.295 z H_m^{5/2}$$

الأقنية ذات المقطع على شكل قطع مكافئ

إن من المناسب أن نعرّف هذه الأقنية بمصطلحين هما العرض العلوي T والعمق D_c، عندها تعطى مساحة المقطع بالعلاقة $a = 2/3\ D_c\ T$، وسنرمز للقطر الوسطي بالرمز D_m.

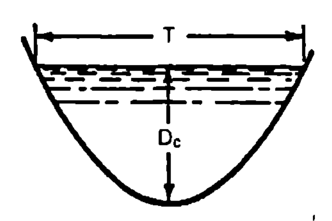
$$V_c = \sqrt{2/3 g D_c}$$

و

$$D_c = \frac{3}{2}\frac{V_c^2}{g}$$

بالتالي

$$Q=\sqrt{\frac{8g}{27}}TD_c^{3/2}$$



الشكل 10.14 قناة مفتوحة ذات شكل قطع مكافئ

وبتعويض g = 32.16

$$Q=3.087TD_c^{3/2}$$

و

$$D_c=\frac{3}{2}\sqrt[3]{\frac{Q^2}{gT^2}}$$

أيضاً

$$Q=\sqrt{\frac{8g}{27}}\left(\frac{3}{4}\right)^{3/2}TH_m^{3/2}$$

وبتعويض g = 32.16

$$Q=2.005TH_m^{3/2}$$

الأقنية التي لها مقطع شبه منحرف

يظهـــر الشـــكل 10.15 قناة لها شكل شبه منحرف له العمق D_c وعرض القعر b، ويرمـــز لمـــيل الوجـــوده - البعد الأفقي مقسماً على البعد الشاقولي - بالرمز z. وبالتعبير عن أبعاد القناة كتوابع للعمق الوسطي D_m، عندها يعطى العمق الحرج D_c والسرعة المتوسطة V_c بالعلاقتين:

$$V_c = \sqrt{\frac{b + zD_c}{b + 2zD_c} gD_c}$$

و

$$D_c = \frac{V_c^2}{c} - \frac{b}{2z} + \sqrt{\frac{V_c^4}{g^2} + \frac{b^2}{4z^2}}$$

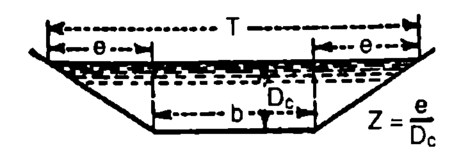
ويعطى معدّل التصريف خلال القناة:

$$Q = \sqrt{g \frac{(b + zD_c)^3}{b + 2zD_c}} D_c^{3/2}$$

ويعطى العمق الحرج والقدرة النوعية الصغرى بالعلاقتين:

$$H_m = \frac{3b + 5zD_c}{2b + 4zD_c} D_c$$

$$D_c = \frac{4zH_m - 3b + \sqrt{16z^2 H_m^2 + 16zH_m b + 9b^2}}{10z}$$



الشكل 10.15 قناة مفتوحة ذات مقطع شبه منحرف

الأقنية دائرية المقطع

يظهر الشكل 10.16 قناة نموذجية دائرية المقطع حيث يمكننا حساب a المساحة، وT العرض العلوي، والعمق D_c بالعلاقات:

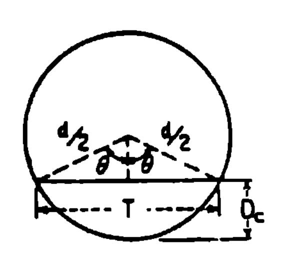
$$a = \frac{d^2}{4}\left(\theta_r - \frac{1}{2}\sin 2\theta\right)$$

$$T = d\sin\theta$$

$$D_c = \frac{d}{2}(1 - \cos\theta)$$

ثم يعطى التدفق بالعلاقة:

$$Q = \frac{2^{3/2} g^{1/2} (\theta_r - 1/2\sin 2\theta)^{3/2}}{8(\sin\theta)^{1/2}(1-\cos\theta)^{5/2}} D_c^{5/2}$$



الشكل 10.16 قناة دائرية المقطع

المضخات

تعاريف

المضخة هي آلة أو جهاز لرفع السائل - والذي يعتبر مائعاً غير قابل للانضغاط - إلى مستوى أعلى أو إلى ضغط أعلى. أما الضاغط فهو آلة أو جهاز لرفع الغاز - والــذي هو مائع قابل للانضغاط - إلى ضغط أعلى. وتدعى الأجهزة التي تطرد الهــواء من أوعية مغلقة بمضخات الهواء، وهي في الواقع ضواغط هواء تعمل تحت الضغط الجوي.

ويضغط النافخ - تمييزاً عن الضاغط - الغاز إلى ضغط أقل نسبياً. أما المروحة فهي بالأصل معدّة لتحريك حجوم كبيرة من الغاز، والضغط الناتج عن المروحة صغير وهو أمر ثانوي الأهمية.

قياسات الارتفاع (فرق الضغط)

يتكون فرق الضغط الذي على المضخة تحقيقه أو العمل ضده من ارتفاع ستاتيكي مضافاً له جميع ضياعات الاحتكاك في الأنابيب، ويمكن حساب قيمته إلا أنه يجب مــن الناحية العملية تحديده ضمن اختبار عبر قياس الضغوط في الأنابيب الموصولة بالمضخة من كلا جانبي الامتصاص والتصريف.

لنفرض

h = الارتفاع الكلي بالأقدام (الأمتار).

p = ضغط السائل معبّراً عنه بالأقدام (الأمتار من السائل).

z = ارتفاع مركز مقياس التصريف فوق النقطة التي يقاس عندها ضغط السحب.

V = السرعة بالقدم في الثانية (متر في الثانية) عند المقطع الموصول به المقياس.

g = تسارع الجاذبية الأرضية، ft/s^2 (m/s^2).

يشـــير الدليل d إلى قيم التصريف، بينما يشير الدليل s إلى قيم السحب، وعندها نستطيع أن نكتب:

$$h = p_d - p_s + z + \frac{V_d^2}{2g} - \frac{V_s^2}{2g}$$

إذا كان الضغط عند جهة المدخل أخفض من الضغط الجوي، وإذا استخدمنا ضغط المقياس في المعادلة السابقة عندها سيأخذ الضغط p_s قيمة سالبة.

القدرة (الطاقة)

إذا فرضنا أن

q – معدّل التصريف، ft^3/s (m^3/s).

G – gal/min (L/min).

w – كثافة السائل، lb/ft^3.

وتدعـــى الاســـتطاعة المسلمة للسائل بالاستطاعة المائية مقدرة بالحصان وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\text{الاستطاعة المائية} = \frac{wqh}{550} hp \quad (1\,hp = 0.75\,kW)$$

وفي حال استخدام الكثافة المألوفة للماء والمساوية للقيمة $62.4\ lb/ft^3$ ($8.0\ Kg/m^3$)، وبالتالي ينتج معنا ما يلي:

$$\text{الاستطاعة المائية} = \frac{qh}{8.81} = \frac{Gh}{3960} hp \quad (1\,hp = 0.75\,kW)$$

ومـــن أجل أنواع أخرى من السوائل لها الثقل النوعي s، ويجب عندها ضرب العلاقـــتين السابقتين بالثقل النوعي s. وإذا كان e المردود الكلي للمضخة

عـــندها تعطـــى استطاعة الدخل للمضخة والتي تدعى عادةً باستطاعة الكبح (brake horsepower) بالعلاقة:

$$\text{استطاعة الكبح} = \frac{qh}{e \times 8.81} = \frac{Gh}{e \times 3960} hp \quad (1hp = 0.75 kW)$$

تحديد المراديد

يعـــرَّف المردود - ويدعى أحياناً المردود الكلي أو الإجمالي - على أنه النسبة بين الاستطاعة المسلمة من السائل إلى استطاعة الدخل للمضخة، ويعطى بالعلاقة:

$$e = \frac{\text{استطاعة الماء hp}}{\text{استطاعة الكبح hp}} = \frac{\text{استطاعة الماء kW}}{\text{استطاعة الكبح kW}}$$

ويعبّر عن المردود الهيدروليكي e_h بالنسبة بين الاستطاعة الفعلية المعطاة من الماء إلى القـــدرة المقدمـــة إلى المـــاء أو السوائل الأخرى، والفرق بين هاتين القيمتين هو ضياعات الاحتكاك الهيدروليكية.

ويعطى المردود الميكانيكي e_m عبر النسبة بين الطاقة المسلمة للماء إلى الطاقة المؤمنة لإدارة المضخة.

والفـــرق بيـــنهما هـــو ضـــياعات الاحتكاك الميكانيكية، مثل الاحتكاكات في المدحرجات... الخ.

ويعطـــى المـــردود الحجمي e_v عبر النسبة بين كمية الماء الفعلية المسلمة إلى تلك الـــواجب تســـليمها إذا لم يكـــن هناك ضياعات تسرب، المقطع غير الكامل للصمام، ... الخ.

ونعـــني بالانـــزلاق Slip - في حالة المضخات ذات الإزاحة الموجبة - الفرق بين الإزاحـــة الحقيقية وحجم السائل المسلّم فعلياً معبراً عنه كنسبة مئوية من الإزاحة. وتعطى العلاقة بين الانزلاق والمردود الحجمي على الشكل التالي:

$$Slip = 100\ (1 - e_v)$$

ويكـــون المردود الكلي عبارة عن حاصل ضرب المردود الهيدروليكي والميكانيكي والحجمي، أي:

$$e = e_h \times e_m \times e_v$$

الخدمـــة (duty) وهو مفهوم آخر يعبر عن مردود محركات الضخ المقادة بالبخار. ويعبّر عن الخدمة عادةً بالقدم. باوند من العمل المنجز لكل 1000 ليبرة (J/454 Kg) مـــن البخار المستجر، ولكنه يُعبَّر بشكل أكثر دقة عن الخدمة بالواحدات التالية، قدم. باوند من العمل المنجَز لكل مليون Btu (J/1.1 MJ) مستجرة.

ارتفاع السحب

يمكن حساب ارتفاع السحب النظري كما يلي:

$$L = b - p_v - h_f - \frac{V_s^2}{2g}$$

حيث

L = ارتفاع السحب (علو المص).

b = الضغط البارومتري للسائل، ft (m).

p_v = ضغط التبخر للسائل، ft (m).

h_f = ضياعات الاحتكاك في الصمام وأنابيب السحب، الخ.

V_s = السرعة عند مدخل المضخة (من جهة سحب المضخة).

وإذا كـــان السائل ماءً فإنه من المفضل إبقاء الضغط أكبر من ضغط التبخر على الأقل بمقدار 10 ft (3 m). ولذلك فإن الارتفاع الأعظمي المسموح به سيكون أقل من القيمة الموجودة في المعادلة السابقة بحوالي 10 ft (3 m).

ويؤخذ ارتفاع السحب عادةً في التطبيقات العملية بقيمة 20 ft (6 m) للماء البارد، ويتناقص كلما ازدادت درجة حرارة الماء، وإذا كانت درجة الحرارة فوق 160 °F (71 °C) فيجب أن يتم تزويد الماء للمضخة وهو تحت ضغط موجب.

الطاقة ضمن أنظمة الضخ

إذا كان المائع غير قابل للانضغاط فإنه يملك قدرة (طاقة) على شكل سرعة وضغط وطاقة كامنة (ارتفاع)، وتنص نظرية برنولي للموائع غير القابلة للانضغاط وللجريان ثابت بدون ضياعات، وأن القدرة عند أي نقطة هي مجموع الارتفاع الناتج عن السرعة والارتفاع الناتج عن الضغط والارتفاع الناتج عن فرق المنسوب، ويعتبر هذا المجموع ثابتاً من أجل خط تدفق ضمن المجرى. لذلك تعطى الطاقة (القدرة) H-(ft.lb/lb) أو ft (m) – النسبية أو المطلقة لأي نقطة من النظام منسوبة إلى مستوي مرجعي مختار بالعلاقة التالية:

$$H = \frac{V^2}{2g} + \frac{144p}{w} + Z$$

حيث

V – السرعة، ft/s (m/s).

g – تسارع الجاذبية الأرضية، وهي تساوي تقريباً 32.17 ft/s^2 (9.81 m/s^2).

p – الضغط (موجب أو سالب)، lb/in^2 (kPa).

w – الوزن النوعي للسائل، lb/ft^3 (Kg/m^3).

Z – المنسوب فوق (+) أو تحت (-) المستوي المرجعي، ft (m).

فرق الارتفاع الكلي للمضخة

يقصد بفرق الارتفاع الكلي للمضخة الفرق في الطاقة بين تصريف المضخة (النقطة 2) وسحب المضخة (النقطة 1)، كما هو موضح في الشكل 10.17، وبتطبيق نظرية برنولي عند كل نقطة، يعطى فرق الارتفاع الكلي للمضخة TH بالأقدام (الأمتار) بالعلاقة التالية:

$$TH = H_d - H_s = \left(\frac{V_d^2}{2g} + \frac{144 p_d}{w_d} + Z_d \right) - \left(\frac{V_s^2}{2g} + \frac{144 p_s}{w_s} + Z_s \right)$$

وتعطى معادلة فرق الضغط للمضخة P_Δ، psi (kPa) كما يلي:

$$\begin{aligned} P_\Delta &= P_d - P_s \\ &= \left[p_d + 0.433 sp\, gr_d \left(Z_d + \frac{V_d^2}{2g} \right) \right] \\ &\quad - \left[p_s + 0.433 sp\, gr_s \left(Z_s + \frac{V_s^2}{2g} \right) \right] \end{aligned}$$

حيث يدل الدليلان d و s على التصريف والسحب على التوالي، و:

H - الارتفاع الكلي (موجب أو سالب)، قدم بالنسبة لمستوي أو قدم مطلق، (m).

P - الضغط الكلي (موجب أو سالب)، psi نسبية (أو psi مطلقة) (kPa).

V - السرعة، ft/s (m/s).

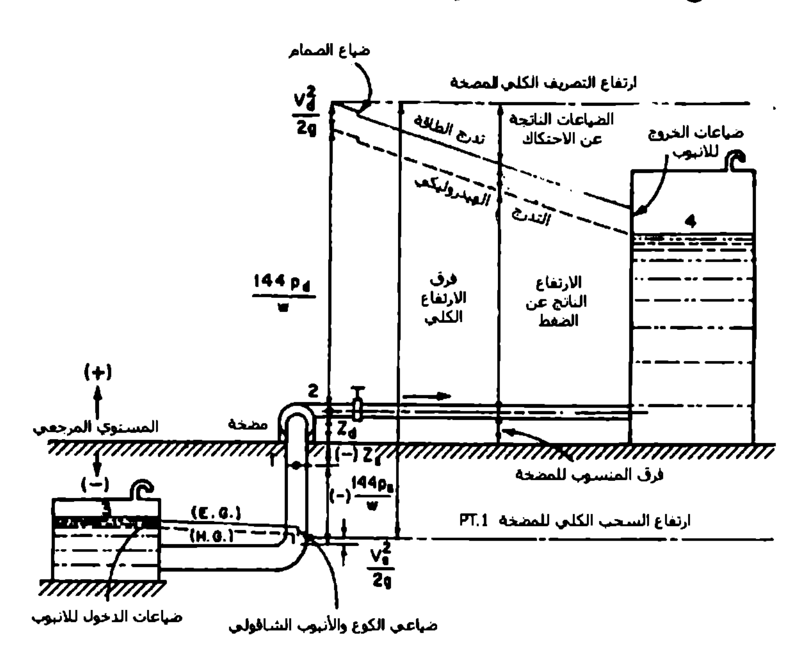
p - الضغط (موجب أو سالب)، psi نسبية أو psi مطلقة، (kPa).

Z - المنسوب فوق (+) أو تحت (-) المستوي المرجعي المختار، ft (m).

w - الوزن النوعي للسائل، lb/ft^3 (Kg/m^3).

sp gr – الكتلة النوعية للسائل.

g – تسارع الجاذبية الأرضية، حوالي ($9.81\ m/s^2$) $32.17\ ft/s^2$.



الشكل 10.17 الطاقة والتدرجات الهيدروليكية

تؤخذ قيمتا فرق الارتفاع الكلي TH، (m) ft، وفرق الضغط للمضخة P_Δ، psi (kPa) دائماً ككميات (كقيم) مطلقة وذلك إما كقيم ضغوط منسوبة (مقاسة) أو كقيم ضغوط مطلقة – ولكن ليس لكليهما – وذلك عند أخذ ضغطي السحب والتصريف للمضخة، كما يجب اختيار مستوي مرجعي عام.

ويمكن نسب فرق الارتفاع الكلي بالأقدام (أمتار) إلى فرق الضغط للمضخة، psi (kPa) كما يلي:

$$TH = \frac{144P\Delta}{w}$$

ويمكـــن تطبيق المعادلة العامة التالية لتحديد فرق الارتفاع الكلي للمضخة بين أي نقطـــتين واقعتين في ضمن نظام الضخ بشرطين الأول أن تكون الطاقة المضافة هي فقط ناتجة عن المضخة والشرط الثاني عدم تغير الوزن النوعي للسائل (مثلاً نتيجة لتغير درجات الحرارة):

$$TH = H_2 - H_1 + \sum h_{f(1-2)}$$
$$= \left(\frac{V_2^2}{2g} + \frac{144p_2}{w} + Z_2\right) - \left(\frac{V_1^2}{2g} + \frac{144p_1}{w} + Z_1\right) + \sum h_{f(1-2)}$$

حـــيث يـــدل الدليلان 1 و2 على أي نقطتين إحداهما فوق المضخة والثانية تحت المضخة على التوالي، و:

H – فرق الارتفاع الكلي (موجب أو سالب)، ft نسبي أو ft مطلق، (m).

V – السرعة، ft/s (m/s).

p – الضغط (موجب أو سالب)، lb/in^2 نسبي أو psi مطلق، (kPa).

Z – المنسوب فوق (+) أو تحت (-) المستوي المرجعي المختار، ft (m).

w – الوزن النوعي للسائل (ويفترض أن يبقى نفسه عند النقطتين)، lb/ft^3 (Kg/m^3).

g – تسارع الجاذبية الأرضية، حوالي $32.17\ ft/s^2$ ($9.81\ m/s^2$).

$\sum h_f$ – مجموع الضياعات بين النقطتين، ft (m).

عند معرفة الثقل النوعي للسائل، فيمكن عندها حساب فرق الارتفاع الناتج عن الضغط بالقدم (بالمتر) من العلاقة التالية:

$$\frac{144p}{w} = \frac{2.31p}{sp\,gr}$$

كمـــا يمكن حساب السرعة ضمن الأنبوب بالقدم في الثانية (بالمتر في الثانية) من المعادلة التالية:

$$V = \frac{gpm \times 0.408}{(pipe\;ID)^2}$$

معادلات الاستطاعة والضغط والتدفق للمضخة

يتم ضخ السائل عبر مضخة دوارنية بتدفق معين، gpm (gallons per minute)، والذي يتغير ويتعلق بدوران محور المضخة بعدد دورات في الدقيقة،(rpm (revolutions per minute، كما يلي:

$$\frac{gpm_2}{gpm_1} = \frac{rpm_2}{rpm_1}$$

حيث يدل الدليلان 1 و2 على معدّل تدفقين مختلفين عند سرعتي دوران للمحور. يـــتغير الارتفاع المحقق HD في المضخة وفق مربع معدّل التدفقين وأيضاً وفق مربع سرعتي الدوران كما يلي:

$$\frac{HD_2}{HD_1} = \left(\frac{gpm_2}{gpm_1}\right)^2 = \left(\frac{rpm_2}{rpm_1}\right)^2$$

وتـــتغير اســـتطاعة الـــدخل للمضخة مع مكعب معدل التدفق، ومكعب سرعة الدوران، ومع الارتفاع المحقق بقوة 1.5 كما يلي:

$$\frac{bhp_2}{bhp_1} = \left(\frac{gpm_2}{gpm_1}\right)^3 = \left(\frac{rpm_2}{rpm_1}\right)^3 = \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)^{1.5}$$

ويمكن حساب استطاعة الكبح لدخل المضخة بالحصان البخاري bhp، لتدفق معطى (gpm) ولثقل نوعي للسائل sp gr، وإذا كان مردود المضخة $Pump_{EFF}$ معروفاً وفق المعادلة التالية:

$$bhp = \frac{gpm \times HD \times sp\,gr}{3960 \times pump_{EFF}}$$

وإذا تمت إدارة المضخة بمحرك كهربائي، وإذا كان مردود المحرك (محرك/محور، M/D_{EFF}) حوالي %(95 - 85) فإنه يمكن حساب استطاعة المحركة الكهربائي كما يلي:

$$mhp = \frac{bhp}{M/D_{EFF}}$$

ويعطى الارتفاع الناتج عن السرعة VH، ft (m)، في نظام الضخ وفق العلاقة:

$$VH = \frac{V^2}{2g}$$

حيث

V = سرعة السائل ضمن الأنبوب، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية الأرضية = $32.2\ ft/s^2$ $(9.81\ m/s^2)$.

ويعطى ارتفاع الضخ للمضخة بالأقدام (بالأمتار) من السائل الذي يضخ وفق العلاقة:

$$HD = \frac{P \times 2.31}{sp\,gr}$$

حيث

sp gr – الثقل النوعي للسائل المراد ضخه، بالمقارنة مع الثقل النوعي للماء – 1.0.

ضياعات الضغط ضمن الأنابيب والملحقات

إذا تدفق مائع ضمن أنبوب أو ملحقات الأنابيب، فإنه ستحدث ضياعات في الضغط ناتجة عن الاحتكاك ضمن الأنبوب والمقاومة التي تبديها الملحقات. وإذا كان الأنبوب طويلاً فإن ضياعات الضغط الناتجة عن الانحناءات أو الصمامات أو الملحقات الأخرى تعتبر مهملة مقارنةً مع الضياعات الناتجة عن طول الأنبوب نفسه، أما إذا كانت الأنابيب قصيرة مع استقامات قليلة فعندها تصبح الضياعات الناتجة عن الانحناءات والصمامات والملحقات الأخرى مؤثرة ولا يمكن إهمالها.

وتستطيع لحساب ضياعات الضغط ضمن الأنابيب المستقيمة استخدام معادلة Darcy-Weisbach أو معادلة Manning أو معادلة Hazen-Williams، بينما تحسب الضياعات ضمن الانحناءات أو الصمامات أو الملحقات الأخرى عبر إيجاد الطول المكافئ لها كما هو مبين في الجدول 10.2. حيث يضاف الطول المكافئ إلى الطول الأصلي للأنابيب لتحديد الطول الكلي الذي سيستخدم في حسابات ضياعات الضغط. ويمكن استخدام أية معادلة من المعادلات الثلاث المذكورة بعد إيجاد الطول الكلي (الإجمالي) وتعويضه وذلك لحساب الضياعات في الضغط.

ارتفاع السحب الموجب الصافي للمضخات الترددية

يتحرك المكبس في المضخات الترددية للأمام والخلف ضمن الاسطوانة مولداً فرقاً في التسارع، ولذلك يجب علينا التعامل مع ارتفاع السحب الموجب الصافي المتوفر.

ارتفاع السحب الموجب الصافي المتوفر

يعـــرّف ارتفاع السحب الموجب الصافي المتوفر (NPSHA) على أنه فرق الارتفاع الســـتاتيكي مضـــافاً له فرق ارتفاع الجو مطروحاً منه ضياعات الرفع والاحتكاك وضغط التبخر والارتفاع الناتج عن السرعة والارتفاع الناتج عن التسارع مقدراً بالقدم والمأخوذ عند المحور المار من مركز أنبوب السحب.

ويمكن اعتبار الارتفاع الناتج عن التسارع هو العامل الأعلى في NPSHA، وقد يبلغ في بعـــض الحـــالات عشرة أضعاف جميع الضياعات الأخرى. ولتحديد الارتفاع الـــناتج عن التسارع يجبُ معرفة معلومات عن المضخة وعن نظام السحب، ولا يمكن حسابه ما لم تتوفر هذه المعلومات.

الارتفاع الناتج عن التسارع

يكون التدفق في أنبوب السحب متموجاً بشكل دائم ويكون متسارع أو متباطئ بشـــكل مستمر ودوري، ولا يعتبر الارتفاع الناتج عن التسارع ضياعاً لأن الطاقة ســـيعاد تخزينها خلال التباطؤ. ويعرّف الارتفاع الناتج عن التسارع وفق العلاقة التالية:

$$H_a = \frac{L \times V \times n \times C}{g \times K}$$

حيث

H_a – ضياع الارتفاع الناتج عن التسارع، ft (m).

L – طول أنبوب السحب، ft (m).

V – السرعة الوسطية في أنبوب السحب، ft/s (m/s).

الجدول 10.2 الطول المكافئ متعلقاً بقطري الأنبوب L/D لمختلف الصمامات والملحقات

صمام كروي، مفتوح كاملاً	450
صمام زاوي، مفتوح كاملاً	200
صمام بوابي، مفتوح كاملاً	13
بثلاثة أرباع الفتح	35
بنصف الفتح	160
بربع الفتح	900
صمامات فحص دوارة، فتحة كاملة	135
صمامات فحص كروية، فتحة كاملة	150
صمامات فراشة، 6 مداخيل أو أكثر، فتحة كاملة.	20
كوع قياسي 90°	30
كوع قياسي 45°	16
كوع بنصف قطر كبير 90°	20
كوع شارع 90°	50
كوع شارع 45°	26
شكل T قياسي:	
التدفق خلال الاتجاه الرئيسي	20
التدفق خلال فرع	60

$$V = \frac{gpm \times 0.321}{\text{مساحة مقطع أنبوب السحب، } in^2}$$

حيث

n – سرعة دوران المضخة، rpm.

g – تسارع الجاذبية الأرضية – $32.2\ ft/s^2$.

K – عامل يتعلق بالموائع المختلفة:

1.4 للماء.

2.5 للنفط.

1.0 سائل مع غاز إدخال.

C – عامل يتعلق بنوع المضخة:

0.115 ثنائية

0.006 ثلاثية

0.08 رباعية

0.04 خماسية

0.055 سداسية

0.028 سباعية

عندما يتكون نظام السحب من أنابيب مختلفة الأقطار، قم بحساب الارتفاع الناتج عن التسارع لكل مقطع على حدة، ثم اجمع الارتفاعات الناتجة عن التسارع لكل مقطع للحصول على الارتفاع الكلي.

إذا كان ارتفاع السحب الموجب الصافي المتوفر – بما فيه الارتفاع الناتج عن التسارع – أكبر من الممكن تأمينه من نظام السحب فإنه يجب زيادة ارتفاع السحب الموجب الصافي، والذي يمكن تحقيقه عبر:

1. زيادة الارتفاع الستاتيكي.
2. زيادة الضغط الجوي.
3. إضافة مضخة دعم للنظام.

4. إضافة مخمّد نبضات.

نستطيع إيجاد أبسط تعريف للارتفاع الناتج عن التسارع كما يلي:

تسارع السائل في أنبوب السحب $G_s = V \times n \times C = ft/s^2$

القوة التي تنتج التسارع $F_S = \frac{W_S \times G_S}{g} = lb,$

حيث

W_s = وزن السائل الموجود في الأنبوب = $LA \times sp\,gr$، و:

قدم من السائل، الارتفاع النظري $H_t = \frac{F_S \times 2.31}{A_S \times sp\,gr} =$

حيث

A_s = مساحة مقطع الأنبوب، وبالتبديل نحصل على:

$$H_L = \frac{W_S VnC \times 2.31}{A_S \times sp\,gr \times g} = \frac{LVnC}{g}$$

$$H_a = \frac{Ht}{K}$$

حيث

K = النسبة بين الارتفاع النظري والارتفاع الحقيقي، ولذلك:

$$H_a = \frac{LVnC}{gK}$$

حيث

rpm = سرعة دوران المضخة، rpm.

h_s = ارتفاع السحب، ft (m).

h_f = ضياعات الاحتكاك في الأنابيب، ft (m).

A_s = مساحة مقطع أنبوب السحب، in^2 (mm^2).

L = طول ذراع التوصيل، (من المركز إلى المركز)، ft (m).

R = نصف قطر العمود المرفقي، ft (m).

l = طول الأنبوب حيثما يتم قياس مقاومة التدفق، ft (m).

A_p = مساحة المكبس، in^2 (mm^2).

ارتفاع السحب الموجب الصافي لمضخات الطرد المركزي

يعـــبر ارتفاع السحب الموجب الصافي (NPSH) h_{sv} عن شروط السحب الأصغرية المطلوبة لمنع حدوث ظاهرة التكهف في المضخة، ويجب أن يحدد ارتفاع السحب المـــوجب الصافي (NPSH) الأصغري أو المطلوب عبر إجراء اختبار عادة ما يتم في المصنع.

ويجب أن يكون NPSH المتوفر مساوياً على الأقل للارتفاع (NPSH) المطلوب إذا أردنـــا تجنب ظاهرة التكهف، وزيادة NPSH المتوفر سيزيد من هامش الأمان تجاه حدوث التكهف. وسنستخدم الرموز التالية والشكل 10.18 لحساب قيمة NPSH:

p_a = الضغط المطلق في الوسط المحيط بالمقياس، الشكل 10.18.

p_s = الضـــغط المقاس (النسبي) ويتم الحصول عليه عبر وصل مانومتر إلى أنبوب سحب المضخة المقطع s-s، يمكن أن يكون موجباً أو سالباً.

p_t = الضـــغط المطلق عند سطح السائل الحر في الخزان المغلق الموصول إلى سحب المضخة.

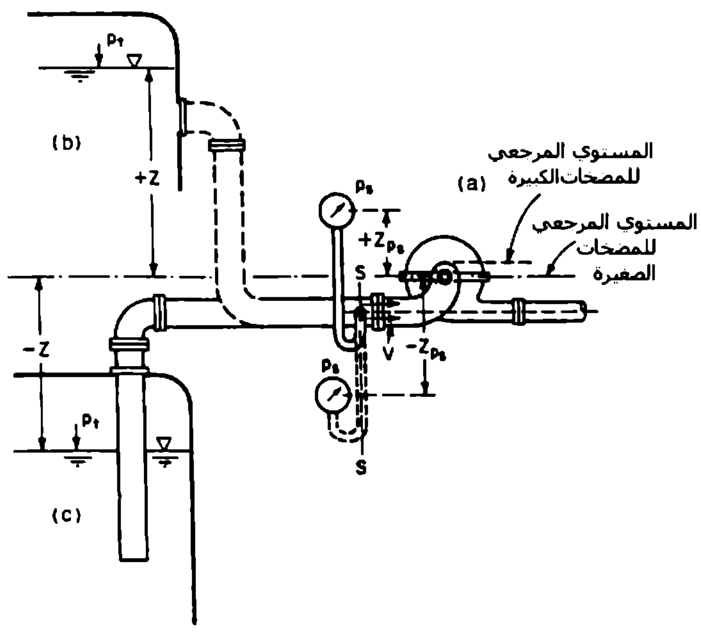
p_{vp} = ضـــغط التبخر للسائل المراد ضخه والمتعلق بدرجة الحرارة عند المقطع s-s، وإذا كـــان السائل خليطاً من الهيدروكربونات، فيجب قياس p_{vp} عبر طريقة نقطة تكون الفقاقيع (bubble point Method).

h_f = الضـــياع في الارتفـــاع الناتج عن الاحتكاك في أنبوب السحب بين الخزان والمقطع s-s.

V = السرعة المتوسطة عند المقطع s-s.

Z_{ps} و Z = المســـافتين الشـــاقوليتين المعرفتين في الشكل 10.18، ويمكن أن تكونا موجبتين أو سالبتين.

γ = الوزن النوعي للسائل عند درجة حرارة الضخ.



الشكل 10.18 مخطط توضيحي لحساب ارتفاع السحب الموجب الصافي (NPSH)

إن مــــن المفضَّـــل اختيار المستوي المرجعي للمضخات الصغيرة كما هو مبين في الشـــكل 10.18، ولكـــن في المضـــخات الكبيرة يجب رفع المستوي المرجعي إلى الارتفـــاع الـــذي يحتمل أكثر أن يبدأ عنده حدوث ظاهرة التكهف. فمثلاً يجب اختيار المستوي المرجعي لمضخة كبيرة ذات مروحة بمحور أفقي عند أقصى ارتفاع يوافق الطرف العلوي للعنفة الدوارة.

ويعطى NPSH المتوفر بالعلاقة:

$$h_{sv} = \frac{p_s - p_{vp}}{\gamma} + \frac{p_s}{\gamma} + Z_{ps} + \frac{V^2}{2g}$$

أو

$$h_{sv} = \frac{p_t - p_{vp}}{\gamma} + Z - h_f$$

يجـــب اختيار واحدات متجانسة تنتمي لنظام واحدات واحد، لذلك سيعطى كل حد موجود في المعادلتين السابقتين بواحدة القدم (أو المتر) من السائل المضخوخ. وأيضاً:

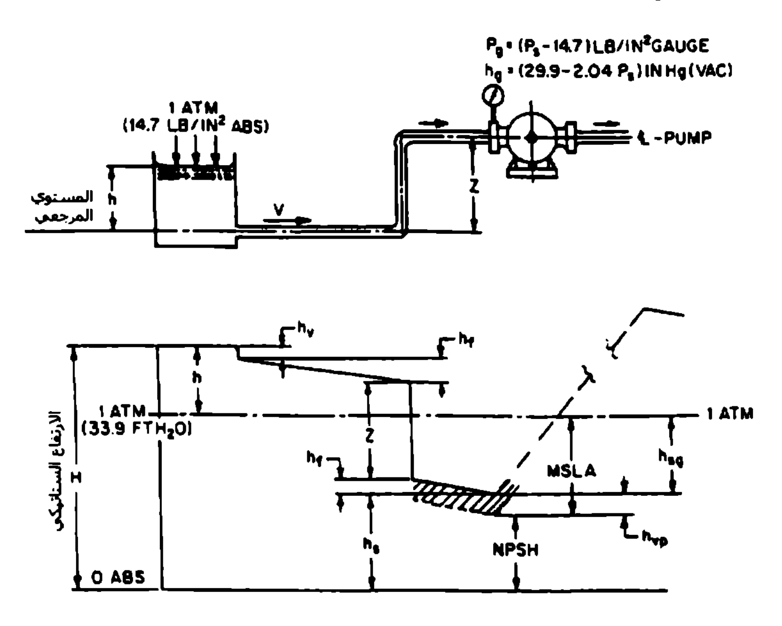
$$h_{sv} = h_b + h_s$$

عـــادة مـــا ندعو القيمة الموجبة للارتفاع h_s بارتفاع السحب، بينما تدعى القيمة السالبة للارتفاع h_s بعلو الامتصاص (ارتفاع المص).

المضخات اللولبية وارتفاع الامتصاص الأعظمي

تحدث عملية الامتصاص عندما يكون الضغط الكلي الناتج عند مدخل المضخة أقل مـــن الضغط الجوي، ومن الطبيعي أن يكون ناتجاً عن تغير الارتفاع والاحتكاك داخـــل الأنبوب. كما تستطيع المضخات اللولبية تأمين تفريغ عالي، ولا يقوم هذا التفـــريغ بإجـــبار المائع على التدفق، وكما شرحنا آنفاً فإن الضغط الجوي أو أي

ضـــغط خارجي (محيط) مطبق هو الذي سيدفع المائع إلى مدخل المضخة. وبما أن الضـــغط الجـــوي عند سطح البحر يصل إلى (مطلقة 14.7 psi أو 30 in Hg) فإنه يعتبر الضغط الأعظمي المتوفر لتحريك المائع، ولا يمكن لارتفاع الامتصاص زيادة هذه القيمة أو الفاعلية. وعملياً يجب توفير قيمة ضغط أخفض وذلك ليتغلب بعضه على تغطية الاحتكاك في مداخل الأنابيب والصمامات والأكواع، ... الخ. وإن من الأمـــور الـــواجب أخذها بعين الاعتبار عملياً هو إبقاء ارتفاع الامتصاص أقل ما يمكن (الشكل 10.19).



الشكل 10.19 العلاقة بين التدرج الهيدروليكي و NPSH و MSLA.

الارتفـــاع الكلي عند المنبع = الارتفاع الناتج عن السرعة + ارتفاع المنسوب + الارتفاع الستاتيكي + ضياع الارتفاع الناتج عن الاحتكاك.

$$H, ft(m) = h + \frac{33.9}{w} = h_v + Z + h_s + \sum(h_f)$$
$$= \frac{V^2}{2g} + Z + \frac{144P_s}{w} + \frac{144P_f}{w}$$

الارتفــاع الســتاتيكي عند مدخل المضخة = ارتفاع السحب الموجب الصافي + ضغط بخار السائل، ft (m) abs.

$$h_s = NPSH + h_{vp}$$

أو

$$NPSH = h_s - h_{vp}$$

ارتفاع الامتصاص الأعظمي المتوفر = NPSH معبراً عنه كنسبة إلى الضغط الجوي (قراءة المقياس).

$$MSLA = 1\ atm - NPSH$$

حيث

P_g, h_g = قراءة الضغط المقاس عند مدخل المضخة، مقاس psi وin Hg(vac).

P_s = الضغط الستاتيكي المطلق عند مدخل المضخة، psi.

h_s, h_{sg} = الارتفــاع الستاتيكي عند مدخل المضخة، ft (m) من السائل، مطلق أم مقاس (نسبي).

Z = الارتفاع الناتج عن فرق المنسوب، ft (m) بالنسبة إلى المستوي المرجعي.

h = مستوى السائل في الخزان، ft(m) بالنسبة إلى المستوي المرجعي.

h_v, h_f = الارتفاع الناتج عن السرعة وضياع الارتفاع الناتج عن الاحتكاك.

p_{vp}, h_{vp} = ضغط بخار السائل، مطلق psi، أو الحرارة، مطلق ft (m).

P_{sv} = ضغط الدخول الموجب الصافي، مطلق psi.

NPSH = ارتفاع السحب الموجب الصافي، ft (m) عمود سائل مطلق.

P_{svr} = ضغط الدخول الموجب الصافي الناتج عن عمل المضخة.

MSLA = ارتفاع الامتصاص الأعظمي المقدَّم من المضخة، ft (m) عمود سائل أو in Hg(vac).

w = الوزن النوعي للسائل.

السرعة النوعية للمضخات التجارية

تعطي المعادلات التالية - الشكل 10.20 - السرعات النوعية النموذجية للمضخات التجارية. وتعطى السرعة النوعية لأي مضخة طاردة مركزية بالعلاقة:

$$S = \frac{rpm, \sqrt{gpm}}{h_{sv}^{3/4}}$$

من أجل نفس Q, S, h_{sv}

$$n_{\text{double suction}} = \sqrt{2n_{\text{single suction}}} = 1.414 n_{\text{single suction}}$$

من أجل نفس Q, H, h_{sv}

$$(n_s)_{\text{double suction}} = \sqrt{2}(n_s)_{\text{single suction}} = 1.414(n_s)_{\text{single suction}}$$

من أجل نفس Q, n_s, h_{sv}

$$H_{\text{double suction}} = 1.587 H_{\text{single suction}}$$

من أجل نفس Q, n

$$(h_{sv})_{\text{double suction}} = 0.630(h_{sv})_{\text{single suction}}$$

$$n_{max} = \frac{S(h_{sv})^{3/4}}{\sqrt{Q}} \cong \frac{8000(h_{sv})^{3/4}}{\sqrt{Q}}$$

حيث

single suction : سحب مفرد.

double suction : سحب ثنائي.

Q = gpm.

H = قدم من السائل المراد ضخه،

n = rpm.

h_{sv} = قدم من السائل المراد ضخه.

سرعة السحب النوعية S

يمكن أن نحصل على سرعة السحب النوعية S المعادلة التالية:

$$S = \frac{N\sqrt{Q}}{(h_{sv})^{3/4}}$$

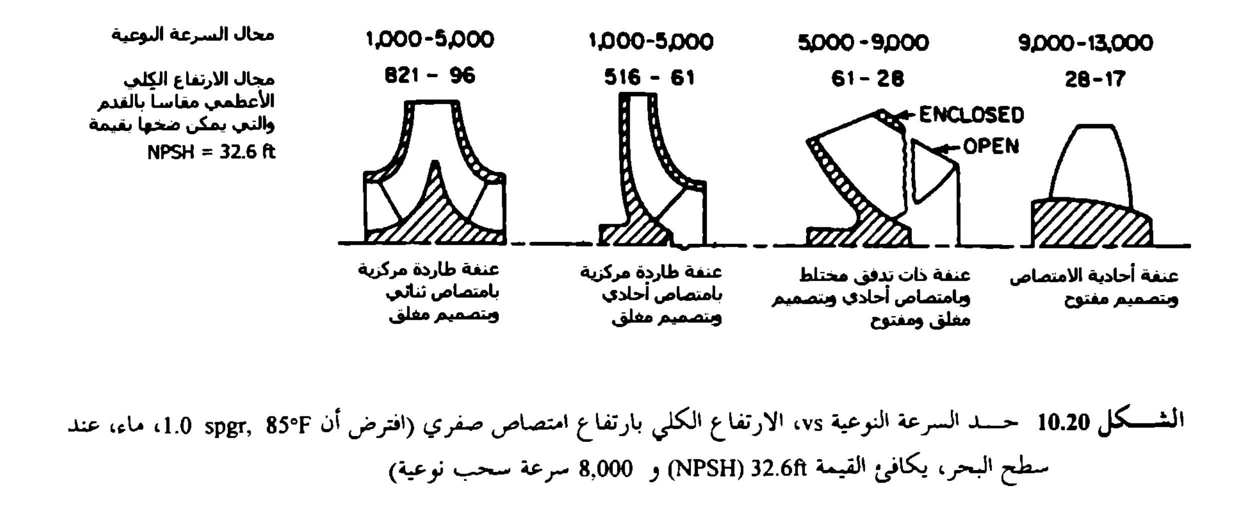
لاحظ بأن التدفق Q يساوي نصف التصريف في حالة كون العنفة ثنائية السحب عند حساب S.

كما يمكن تقسيم المعادلات في الشكل 10.20 إلى الحدود:

$$\sigma = \left(\frac{n_s}{S}\right)^{4/3}$$

أو

$$n_s = S\,(\sigma)^{1/4}$$



الشكل 10.20 حد السرعة النوعية vs، الارتفاع الكلي بارتفاع امتصاص صفري (افترض أن 85°F, spgr 1.0، ماء، عند سطح البحر، يكافئ القيمة 32.6ft (NPSH) و 8,000 سرعة سحب نوعية)

تشغيل المضخات الطاردة المركزية عند معدلات تدفق منخفضة

عـــندما ينخفض التدفق خلال المضخة الطاردة المركزية فإن درجة حرارة السائل المراد ضخه سترتفع بشكل سريع ويمكن حسابها وفق العلاقة:

$$T_m = \frac{42.4 \times P_{so}}{W_w \times C_w}$$

حيث:

T_m = ارتفاع درجة الحرارة، °F/min.

P_{so} = استطاعة الكبح مقدرة بالحصان عند الإيقاف.

42.4 = عامل تحويل من bhp إلى Btu/min.

W_w = وزن السائل الصافي داخل المضخة، lb.

C_w = الحرارة النوعية للسائل (وتساوي 1.0 إذا كان السائل هو الماء).

إذا استمر التدفق خلال المضخة وبعد أن تصبح هذه الشروط مستقرة، فمن الممكن حساب ارتفاع درجة الحرارة خلال المضخة لأي تدفق معطى، وبفرض أن السائل هو الماء فإنه يمكننا استخدام المعادلة التالية:

$$T = \frac{(bhp - whp) \times 2545}{capacity, lb/h}$$

حيث

T = ارتفـــاع درجـــة الحرارة، °F/min، و2545 = Btu مكافئة لحصان بخاري في الساعة hp.hr.

وهـــناك علاقـــة أخرى تعطي ارتفاع درجة الحرارة ولكن بدلالة الارتفاع الكلي ومردود المضخة كما يلي:

$$T = \frac{H}{778}\left(\frac{1}{e} - 1\right)$$

حيث

H = الارتفاع الكلي، ft.

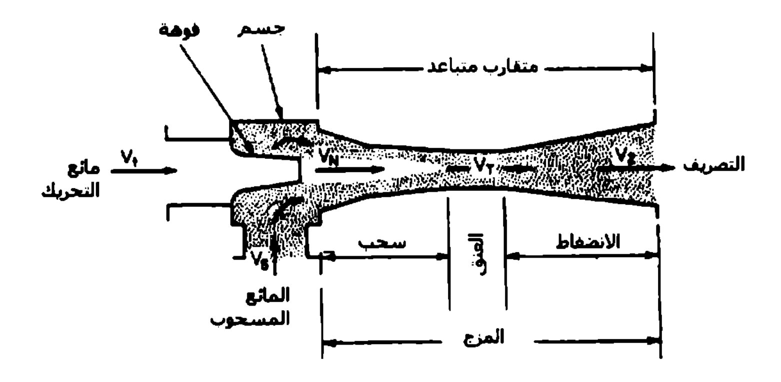
e = مردود المضخة عند السعة المعطاة.

(لاحــظ بــأن هــذه المعادلات تهمل تأثير انضغاطية الماء، ولكن من أجل إجراء حسابات أدق لارتفاع درجة الحرارة وخاصة عند الضغوط المرتفعة جداً فإنه يجب أخذ الحسابات الترموديناميكية بعين الاعتبار).

المستخرِجات (المفرِّغات) Eductors

مقدمة نظرية وتصميمية

لقــد طُوِّرت نظرية المستخرج (المفرِّغ) (الشكل 10.21) من معادلة برنولي. حيث يحوَّل الضغط الستاتيكي عند مدخل الفوهة إلى طاقة حركية عبر إجبار المائع على الــتدفق بحرية من خلال فوهة متقاربة. حيث يشكلُ ذلك المائع الناتج ذو السرعة العالــية مائــع الامتصاص في حجرة السحب، وتكون نتيجة امتزاج الموائع تدفق بسرعة متوسطة. يقوم الناشر بعدها بتحويل ضغط السرعة ثانيةً إلى ضغط ستاتيكي عند تصريف المائع من المستخرِج.



الشكل 10.21 فوهة نافثة تحول طاقة الضغط إلى سرعة عبر وضع متقارب ومزج الموائع ومن ثم تحويل السرعة ثانية إلى ضغط

وبكتابة معادلة برنولي لمائع التحريك (المائع المحرِّك) خلال فوهة المستخرِج (المفرِّغ)، يكون لدينا:

$$\frac{P_1}{w_1}+\frac{V_1^2}{2g}=\frac{P_s}{w_1}+\frac{V_N^2}{2g}$$

حيث

P_1 = الضغط الستاتيكي بعيداً عن الفوهة، lb/ft^2.

P_s = الضغط الستاتيكي عند الامتصاص (عند فم الفوهة)، lb/ft^2.

V_1 = السرعة بعيداً عن الفوهة، ft/s.

V_N = السرعة عند فتحة الفوهة (فم الفوهة)، ft/s.

w_1 = الوزن النوعي للسائل المحرِّك، lb/ft^3.

قبل الفوهة يمكن اعتبار جميع الطاقة هي ارتفاع ستاتيكي وبالتالي سيحذف الحد V_1، وبالتعويض نجد:

$$\frac{V_N^2}{2g}=\frac{P_1-P_s}{w_1}$$

يدعى هذا الحد بالارتفاع العامل (ارتفاع العمل) (**operating head**).

وبتطبيق نفس المبدأ ضمن المتقارب المتباعد على الجريان الممزوج، ماعدا التأثير المعاكس للفوهة يمكننا كتابة:

$$\frac{P_s}{w_2}+\frac{V_T^2}{2g}=\frac{P_2}{w_2}+\frac{V_2^2}{2g}$$

حيث

P_s = الضغط الستاتيكي عند طرف السحب، lb/ft^2.

P_2 = الضغط الستاتيكي عند التصريف، lb/ft^2.

V_T = السرعة خلال عنق المتقارب المتباعد، ft/s.

V_2 = السرعة عند طرف التصريف بعد الفوهة، ft/s.

w_2 = الوزن النوعي للموائع الممزوجة، lb/ft^3.

وعند طرف التصريف وبعيداً عن الناشر فإننا نفترض بأن السرعة تحولت إلى ضغط ستاتيكي، وبالتالي $V_2 = 0$.

ويمكننا كتابة:

$$\frac{V_T^2}{2g}=\frac{P_2-P_s}{w_2}$$

يدعى هذا الحد بارتفاع التصريف (discharge head). وتعرّف نسبة الارتفاع R_H عندها على أنها الارتفاع العامل منسوباً على ارتفاع التصريف:

$$R_H = \frac{V_N^2/2g}{V_T^2/2g} = \frac{V_N^2}{V_T^2} = \frac{(P_1 - P_s)/w_1}{(P_2 - P_s)/w_2} = \frac{(P_1 - P_s)w_2}{(P_2 - P_s)w_1}$$

وبسبب وجود النسب فإنه من المناسب استبدال الوزن النوعي بالكتلة النوعية:

$$R_H = \frac{(P_1 - P_s)sp\,gr_2}{(P_2 - P_s)sp\,gr_1}$$

عـــندما يكــون المائع المحرِّك هو نفسه المائع الممتص، فإنه لا حاجة لتصحيحات الجاذبية وستصبح المعادلة السابقة:

$$R_H = \frac{H_1 - H_s}{H_2 - H_s}$$

حيث

$H_1 - H_s$ = الارتفاع العامل، ft.

$H_2 - H_s$ = ارتفاع التصريف، ft.

وتحدد شروط السحب عبر تطبيق معادلة الكميات كما يلي:

$$M_1 V_N + M_s F_s = (M_1 + M_s) V_T$$

حيث

M_1 = كتلة المائع المحرِّك، Slugs (وحدة فنية بريطانية للكتلة).

M_2 = كتلة المائع الممتص، Slugs.

V_N = السرعة عند تصريف الفوهة، ft/s.

V_s = السرعة عند مدخل السحب، ft/s.

V_T – السرعة عند عنق المتقارب المتباعد، ft/s.

وباعتبار السرعة عند مدخل السحب معدومة فإنه:

$$M_s = M_1\left(\frac{V_N}{V_T} - 1\right)$$

ويعرَّف الحد التالي على أنه النسبة الوزنية العاملة:

$$R_w = \frac{M_s}{M_1} = \frac{V_N}{V_T} - 1$$

وبمعرفة أن الحد V_N^2 / V_T^2 تم تعريفه على أنه نسبة الارتفاع R_H، سنكتب:

$$R_W = \sqrt{R_H} - 1$$

ويمكن الآن إيجاد نسبة الحجم R_q كما يلي:

$$\frac{Q_s}{Q_1} = R_W \frac{sp\,gr_1}{sp\,gr_2}$$

حيث

Q_s – تدفق السحب بواحدات الحجم.

Q_1 – تدفق المائع المحرِّك بواحدات الحجم.

تصميم محور المضخة

معيار التصميم

إجهاد الانحناء: يمكن حساب إجهادات الفتل في المحور بتطبيق المعادلتين التاليتين:

$$S_s = \frac{16T}{D_o^2} \qquad \text{للمحاور المصمتة}$$

$$S_s = \frac{16T}{D_o^2(1 - D^4 / D_o^4)}$$ للمحاور المفرغة

حيث

S_s = إجهاد قص الفتل، lb/in^2.

T = العزم المنقول، lb.in.

D = قطر المحور الداخلي (من أجل المحاور المفرغة فقط)، in.

D_o = قطر المحور الخارجي، in.

تعتمد قيمة إجهاد القص المسموح به على نوع المعدن الذي سيصنّع منه المحور، وفيما إذا كان معرّضاً أيضاً لحمولات أخرى، مثل الانحناء أو الضغط. يجب أن يكون عامل أمان التصميم للمحور مساوياً أو أكبر من المركبات الأخرى التي سيتعرض لها.

السرعة الحرجة: تحدد السرعة الحرجة لمحور عبر تحديد الانحراف أو التشوه له، أو تدلي المحور في الوضع الأفقي تحت تأثير وزنه فقط، حيث يعتبر هذا التدلي "sag" هو المعيار الأصغر، بينما تعتبر السرعة الحرجة هي المعيار الأكبر. وعملياً ستكون للمحاور الطويلة والرفيعة سرعة حرجة منخفضة، بينما ستكون للمحاور القصيرة وذات الأقطار الكبيرة سرعة حرجة عالية جداً، ويعطى الانحراف لمحور بسيط التثبيت وفق العلاقة:

$$y = \frac{5wL^4}{384EI} =$$ انحراف (تشوه) المحور

لاحظ أن:

$$I = \frac{\pi D_o^4}{64}$$ للمحاور المصمتة

$$I = \frac{\pi(D_o^4 - D^4)}{64}$$ للمحاور المفرغة

حيث

w = وزن المحور لكل واحدة طول، lb/in.

L = الطول بين المدحرجات التي يستند عليها المحور، in.

E = معامل يونغ، psi.

I = عزم العطالة، in^4.

وبمعـــرفة الانحراف أو التشوه العمودي للمحور، فإنه من الممكن حساب السرعة الحرجة الأولى من المعادلة:

$$N_{crit} = 187\sqrt{\frac{1}{y}}$$

والـــتي تعـــبر عن السرعة الحرجة مباشرةً بعدد الدورات في الدقيقة rpm للمحور الدوار.

حسابات استطاعة المضخة

استطاعة الخرج

يمكن إيجاد استطاعة الماء (Whp) أو العمل المفيد المنجز بتطبيق العلاقة:

$$whp = \frac{\text{الارتفاع الكلي بالقدم من السائل} \times \text{lb/min من السائل المضخوخ}}{33{,}000 \text{ كتلة نوعية مساوية}}$$

إذا كان للسائل ثقلاً نوعياً مساوياً للواحد ووزناً نوعياً مساوياً للقيمة $62.3\ lb/ft^3$ عند درجة الحرارة 68 °F، عندها ستصبح المعادلة كما يلي:

$$whp = \frac{gpm \times head, ft}{3960}$$

استطاعة الدخل

يمكن إيجاد استطاعة الكبح المطلوبة لتحريك المضخة عبر تطبيق المعادلة:

$$\text{bhp} = \frac{\text{gpm} \times \text{total head, ft}}{3960 \times \text{pump efficiency}}$$

حيث نحصل على مردود المضخة من المعادلة التالية:

$$\text{مردود المضخة} = \frac{\text{الخرج}}{\text{الدخل}} = \frac{\text{whp}}{\text{bhp}}$$

وتعطى الاستطاعة الكهربائية (ehp) المقدمة للمحرك بالعلاقة:

$$\text{ehp} = \frac{\text{bhp}}{\text{motor efficiency}}$$

$$= \frac{\text{gpm} \times \text{head, ft}}{3960 \times \text{pump efficiency} \times \text{motor efficiency}}$$

وتعطى استطاعة الدخل للمحرك بالكيلو واط كما يلي:

$$\text{kW input} = \frac{\text{bhp} \times 0.746}{\text{motor efficiency}}$$

$$= \frac{\text{gpm} \times \text{head} \times 0.746}{3960 \times \text{pump efficiency} \times \text{motor efficiency}}$$

مردود المضخة

يعطى مردود المضخة بالعلاقة التالية:

$$\text{pump efficiency} = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{\text{whp}}{\text{bhp}}$$

ومن أجل مضخة مقادة بمحرك كهربائي فإنه يمكن إيجاد المردود الإجمالي كما يلي:

المردود الإجمالي = مردود المضخة × مردود المحرك.

وإن مـــن المطلوب في العديد من المواصفات أن يستخدم محرك عمل فعلي خاص بالمضخة خلال اختبارات حقلية أو في المتجر. واعتماداً على هذا النوع من الاختبار فإن المردود الكلي هنا يأخذ تسمية شائعة حيث يسمى مردود سلك إلى ماء (wire - to - water efficiency) ويعطى بالعلاقة:

$$\text{Overall efficiency} = \frac{\text{whp}}{\text{ehp input}} = \frac{\text{whp}}{\text{ehp}}$$

كيف تشكل جداول أنابيب الفولاذ

استخدم المعادلة التالية لتشكيل سماكات الأنابيب المطلوبة والمعادن وحجم الأنبوب الاسمي من أجل استخدامه في تطبيق عملي.

$$t_m = \frac{PD}{2S + 2yP} + C$$

حيث

t_m = سماكـــة الجدار الأصغرية، in. وإذا أوجدت السماكة الاسمية أضف إليها % 1.25 لتغطية تسامحات المعمل.

P = الضغط الداخلي الأعظمي، psig، عند درجة حرارة العمل (التشغيل).

D = قطر الأنبوب الخارجي، in.

S = الإجهـــاد المسموح به عند درجة حرارة التشغيل (العمل)، psi، ويؤخذ من المراجع الهندسية.

C = تسامح للاستقرار الإنشائي فقط، خذ تسامحاً إضافياً للتآكل من الجدول التالي:

الجدول 10.3

أنبوب محلزن (وأصغر 3/4-in)	0.065
أنبوب محلزن (وأكبر 1-in)	عمق الحلزنة
أنبوب مخدّد	عمق التخديد
أنبوب غير محلزن النهاية (وأصغر $3\frac{1}{2}-in$)	0.065
أنبوب غير محلزن النهاية (وأكبر 4-in)	0.000

y = معامل درجة الحرارة والمعدن:

الجدول 10.4

نوع الفولاذ	درجة الحرارة، °F					
	تحت 900	950	1000	1050	1100	فوق 1150
فريتي	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
أوستينيتي	0.4	0.4	0.4	04	0.5	0.7

ابحث الآن في جدول خصائص الأنابيب واستخرج الأنبوب الذي يملك السماكة الأكبر مباشرة من السماكة المحسوبة، وأعد تفقد وفحص مجالات الضغط ودرجات الحرارة باستخدام أبعاد الأنبوب الفعلي. وباستخدام ID للأنبوب الفعلي أعد تفحص الضياعات الهيدروليكية.

تقدير وزن الأنبوب تبعاً لكل قدم من الطول

احصل أولاً على القطر الداخلي مقدراً بالإنش من المعادلة:

$$ID = OD - 2t$$

حيث

ID – القطر الداخلي للأنبوب، in.

OD – القطر الخارجي للأنبوب يؤخذ من الجدول، in.

t – سماكة جدار الأنبوب وتؤخذ من الجدول، in.

عندها:

$$Wt/ft\ of\ length = 0.85\ \pi\ (OD^2 - ID^2)$$

معادلات الجريان الصفحي والمضطرب في الأنابيب

تـوجد هنا 21 معادلة – ستة للجريان المضطرب و15 للجريان الصفحي للموائع داخل الأنابيب – تعبر عن الجريان داخل أنبوب موضوعة في الجدول 10.5. وتؤمن هـذه المعـادلات تحويلات سهلة عند معرفة متغيرات مختلفة عن الجريان، وهذه المتغيرات هي طول الأنبوب، سرعة المائع، قطر الأنبوب، ضياعات الضغط، معدّل التدفق، عامل الاحتكاك، السرعة المطلقة.

مصطلحات ورموز

cSt – cP ($lb.s/ft^2$)

d – قطر الأنبوب الداخلي، in.

D – قطر الأنبوب الداخلي، ft.

f – عامل الاحتكاك، لا بعدي.

g – الجاذبية الأرضية.، $32.2\ ft/s^2$.

H_L – ضياعات الارتفاع، ft.

L = طول الأنبوب، ft.

L_{in} = طول الأنبوب، in.

Δp = ضياعات الضغط، psi.

ΔP = ضياعات الضغط، psf.

q = التدفق، gal/min.

Q = التدفق، ft^3/s.

$Q_{in.^3}$ = التدفق، in^3/s.

R_e = رقم رينولدز .$\rho DV/\mu$ واحداته النموذجية:

$3162\ q/d\nu_{cSt}$ gal/min, in, cSt
$50.6\ q\gamma/d\mu_{cp}$ gal/min, lb/ft^3, in, cP
$\gamma DV/g\mu$ lb/ft^3, ft, ft/s, $lb.s/ft^2$

v = سرعة المائع، in/s.

V = سرعة المائع، ft/s.

μ = اللزوجة المطلقة، $lb.s/ft^2$.

ν = μ/ρ، اللزوجة الحركية، ft^2/s.

ρ = كثافة الكتلة، $lb.s^2/ft^4 = slugs/ft^3$.

γ = كثافة الوزن، lb/ft^3.

ϵ/D = الخشونة النسبية لجدار الأنبوب، قيم ϵ، ft، للأنابيب المسحوبة 5×10^{-6}، الفولاذ أو الحديد المطاوع 150×10^{-6}، D = القطر الداخلي.

الجدول 10.5 معادلات الجريان ضمن الأنابيب

العلاقات التجريبية العامة لكلا الجريانين , $H_l = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$; الصفحي فقط , $H_L = 32\frac{\mu L V}{\rho g d^2}$; تحويلات هامة , للزيت فقط (= 55 lb/ft²).

L	V	D	ΔP	Q	f	μ	صياغ الضغط	المعادلات: السرعة	التدفق
							لكلا الجريانين		
ft	$\frac{ft}{s}$	in	psi	$\frac{ft^3}{s}$	—	—	$\Delta p = f\frac{L}{d}V^2 \times 0.072$	$V = \sqrt{\frac{d\,\Delta p}{fL}} \times 3.73$	$Q = \sqrt{\frac{d^3\,\Delta p}{fL}} \times 0.0203$
ft	$\frac{ft}{s}$	in	psi	gal/min (q)	—	—	$\Delta p = f\frac{L}{d^5}q^2 \times 0.0123$	$V = \sqrt{\frac{d\,\Delta p}{fL}} \times 3.73$	$q = \sqrt{\frac{d^5\,\Delta p}{fL}} \times 9.1$
							للجريان الصفحي فقط		
ft	$\frac{ft}{s}$	in	psi	$\frac{ft^3}{s}$	—	cSt	$\Delta p = \nu\frac{L}{d^2}V \times 0.0006$	$V = \frac{d^2\,\Delta p}{\nu L} \times 1670$	$Q = \frac{d^4\,\Delta p}{\nu L} \times 9.1$
ft	$\frac{ft}{s}$	in	psi	gal/min	—	cSt	$\Delta p = \nu\frac{L}{d^4}q \times 2.45 \times 10^{-4}$	$V = \frac{d^2\,\Delta p}{\nu L} \times 1670$	$q = \frac{d^4\,\Delta p}{\nu L} \times 4080$
in	$\frac{in}{s}$	in	psi	$\frac{in^3}{s}$	—	$\frac{lb \cdot s}{in^2}$	$\Delta p = \mu\frac{L_{in}}{d^4}Q_{in^3} \times 40.75$	$V = \frac{d^2\,\Delta p}{\mu L_{in}} \times 0.0312$	$Q_{in^3} = \frac{d^4\,\Delta p}{\mu L_{in}} \times 0.0245$
ft	$\frac{ft}{s}$	ft	lb/ft²	$\frac{ft^3}{s}$	—	$\frac{lb \cdot s}{ft^2}$	$\Delta p = \mu\frac{L}{D^2}V \times 32$	$V = \frac{D\,\Delta P}{\mu L} \times 0.0312$	$Q = \frac{D^4\,\Delta P}{\mu L} \times 0.0248$
ft	$\frac{ft}{s}$	ft	lb/ft²	gal/min	—	$\frac{lb \cdot s}{ft^2}$	$\Delta p = \mu\frac{L}{D^4}q \times 0.091$	$V = \frac{D^2\,\Delta P}{\nu L} \times 0.0312$	$q = \frac{D^4\,\Delta P}{\nu L} \times 11$

معادلات جريان الهواء ضمن الأنابيب والصمامات ولوازمها

ينشـــر الصـــانعون معـــادلات مختلفة لجريان الهواء، وسنورد هنا عشرة معادلات والبـــيانات التي تعرّف هذه المعادلات، مع معادلات التحويل (الجدولين 10.6 و10.7)، وعند استخدام أي معادلة من هذه المعادلات في عملية التصميم فإنها ستعطي نتائجاً معقولة ومقبولة.

مصطلحات ورموز

Q – جريان الهواء بواحدات قياسية، scfm (14.7 psi, 68 °F).

q – جريان الهواء بشروط حقيقية، cfm. $Q = q\,(P/14.7)\,(528/T)$.

V – السرعة، ft/s (متوسطة خلال الصمام).

P – الضغط بواحدات مطلقة، psia (الدليل D – قبل المقياس، U – بعد المقياس).

p – الضغط المقاس، psi.

ΔP – انخفاض الضغط، psi.

r – نسبة الضغط P_D/P_U.

ρ – الكتلة، lb/ft^3.

G – الثقل النوعي، ρ_{gas}/ρ_{air}.

T – درجة الحرارة المطلقة، $°R = °F + 460$.

A – مساحة الدخول للأنبوب، in^2.

D_e – القطر المكافئ للنافورة حادة الحافة، in (معامل التصريف $C_D = 0.6$).

M – الوزن المولي، lb (M = 29 lb for air).

W = التدفق الوزني للماء، lb/s.

C_v K, F, D_e = معــاملات تدفــق نموذجية (وتدعى أيضاً ثوابت التدفق وعوامل التدفق) تستخدم في معادلة التدفق.

الجدول 10.6 معلومات الصانعين لأدوات أو أجهزة جريان الهواء

العنصر	معامل التدفق	معادلة التعريف
صمام يدوي	$C_V = 1.26$	$C_V = \frac{Q \times 60}{1360}\sqrt{\frac{GT_U}{\Delta P \times P_U}}$
مخفض ضغط	$D_o = 0.25$	$D_o = \sqrt{\frac{Q}{33P_U} \times \frac{1}{\sqrt{r(r^{0.43} - r^{0.71})}}}$
صمام تحكم	F = غير معروف	$F = \frac{Q}{P_U\sqrt{8/5}}\sqrt{\frac{1}{r(1-r)(3-r)}}$
محرك هوائي	Q = 250 scfm; P = 600 psia (معطى)	

الجدول 10.7 معادلات التحويل بين متغيرات جريان الهواء

	D_e	C_v	F	K: $r = 1.0$	K: $r = 0.75$	K: $r = 0.5$
D_e		$= 0.236\sqrt{C_v}$	$= 0.316\sqrt{F}$	$= 1.456\frac{\sqrt{A}}{K^{1/4}}$	$= 1.521\frac{\sqrt{A}}{K^{1/4}}$	$= 1.641\frac{\sqrt{A}}{K^{1/4}}$
C_v	$= 18.0D_e^2$		$= 1.8F$	$= 38.2\frac{A}{\sqrt{K}}$	$= 41.5\frac{A}{\sqrt{K}}$	$= 48.3\frac{A}{\sqrt{K}}$
F	$= 10D_e^2$	$= 0.556C_v$		$= 21.2\frac{A}{\sqrt{K}}$	$= 23.1\frac{A}{\sqrt{K}}$	$= 26.9\frac{A}{\sqrt{K}}$
$r = 1.0$	$= 4.5\frac{A^2}{D_e^4}$	$= 1460\frac{A^2}{C_v^2}$	$= 450\frac{A^2}{F^2}$			
$K, r = 0.75$	$= 5.36\frac{A^2}{D_e^4}$	$= 1725\frac{A^2}{C_v^2}$	$= 534\frac{A^2}{F^2}$			
$r = 0.5$	$= 7.29\frac{A^2}{D_e^4}$	$= 2330\frac{A^2}{C_v^2}$	$= 724\frac{A^2}{F^2}$			

لاحظ = يتغير العامل K مع r و A، ويجب عليك معرفة أي قيمة استخدمها المصنع لاستخراج قيمة K.

فمثلاً إذا أخذ K عند $r = 0.75$ و مساحة دخول للصمام $A = 0.2$، عندها $F = 23.1 \times 0.2/\sqrt{K} = 4.62/\sqrt{K}$

معادلة الجريان (حرجة نوعاً ما) (ft³/min ،قياسي ،scfm =Q)	تعريف معامل التدفق	
$Q = 33D_o^2P_i\sqrt{r(r^{0.43} - r^{0.71})}$	D_o = مكافئ النافورة حادة الحواف معامل التصريف $C_D = 0.6$)	$= \sqrt{\frac{Q}{33\,P_U}} \times \frac{1}{\sqrt{r(r^{0.43} - r^{0.71})}}$
$Q = \frac{963}{60} C_V \sqrt{\frac{\Delta P(P_U + P_D)}{GT_U}}$	C_V = معامل الصمام	$= \frac{W \times 60}{963} \sqrt{\frac{GT_U}{\Delta P(P_U + P_D)}}$
$Q = \frac{1360}{60} C_V \sqrt{\frac{\Delta P \times P_U}{GT_U}}$	C_V = معامل التدفق	$= \frac{Q \times 60}{1360} \sqrt{\frac{GT_U}{\Delta P \times P_U}}$
$Q = \frac{1390}{60} C_V \sqrt{\frac{\Delta P \times P_D}{GT_U}}$	C_V = عامل السعة	$= \frac{Q \times 60}{1390} \sqrt{\frac{GT_U}{\Delta P \times P_D}}$
$Q = \frac{5180}{60} C_V \sqrt{\frac{P_U^2 - P_D^2}{MT_U}}$	C_V = معامل التدفق ضمن الصمام	$= \frac{Q \times 60}{5180} \sqrt{\frac{MT_U}{P_U^2 - P_D^2}}$
$Q = \frac{963}{60} C_V \sqrt{\frac{P_V^2 - P_D^2}{GT_U}}$	C_V = معامل التدفق	$= \frac{Q \times 60}{963} \sqrt{\frac{GT_U}{P_U^2 - P_D^2}}$

الجدول 10.8 معادلات جريان الهواء النموذجية

الجدول 10.8 معادلات جريان الهواء النموذجية /تابع/

معادلة الجريان (حرجة نوعاً ما) (Q= scfm، قياسي، ft³/min)	تعريف معامل التدفق	
$Q = \frac{2.32^{0.443}}{60} C_o \frac{\Delta P^{0.443} \times P_U^{0.6}}{\sqrt{GT_U/520}}$	C_o = معامل جريان الغاز	$= \frac{Q \times 60}{(2.32)^{0.443}} \times \frac{\sqrt{GT_U/520}}{\Delta P^{0.443} \times P_U^{0.6}}$
$Q = FP_U \sqrt{\frac{4}{3}} \sqrt{1 - r^2}$	F = NBS عامل جريان #1	$= \frac{Q}{P_U \sqrt{4/3}} \sqrt{\frac{1}{1 - r^2}}$
$Q = FP_U \sqrt{\frac{8}{5}} \sqrt{r(1 - r)(3 - r)}$	F = (#2 -better) NBS عامل جريان	$= \frac{Q}{P_U \sqrt{8/5}} \sqrt{\frac{1}{r(1 - r)(3 - r)}}$
$Q = 38.1\ P_U A \sqrt{\frac{1 - r}{K}}$	K = العامل K	$= \frac{2g}{\rho V^2} \Delta P$

Taken from catalogs.

أنظمة امتصاص الهواء في محركات الاحتراق الداخلي

إن أول خطـــوة في تصميم نظام امتصاص الهواء لمحرك احتراق داخلي هي معرفة كمـــية الهـــواء المطلوبة للاحتراق، وتعطى كمية الهواء المطلوبة بالقدم المكعب في الدقيقة بالعلاقة التالية:

$$\text{الهواء المطلوب} = \frac{B^2 S \times rpm \times N}{2200K}$$

حيث

B – قطر الاسطوانة، in.

S – شوط المكبس، in.

rpm – سرعة دوران المحرك، rpm.

N – عدد الاسطوانات.

K – ثابت. لثنائي الشوط = 1، لرباعي الشوط = 4.

سيتغير المردود الحجمي مع تصميم المحرك ولكن يمكن أخذ متوسط 80 % لتحديد حجم مصفاة الهواء.

الأساسات لمحركات الاحتراق الداخلي

يعتـــبر تصـــميم الأساسات هاماً جداً عند التحضير لتركيب محركات الاحتراق الداخلـــي، إذ يعـــتمد حجم وكتلة الأساسات على أبعاد ووزن المحرك والمولد أو المضـــخة إذا كانت منشآت إدارة مضخة. ويجب عليك اتباع هذه القيم الأساسية على الأقل:

1. يجـــب أن يستوعب العرض عرض الجهاز مع عرض إضافي وطول إضافي على الأقل قدم واحد.

2. يجب أن يكون العمق كافياً لتأمين وزن من الاسمنت مساوٍ لـــ 1.3 إلى 1.5 مرة من وزن الجهاز، ويحدد هذا العمق وفق العلاقة:

$$H = \frac{(1.3 - 1.5)W}{LB \times 135}$$

حيث

H = عمق الأساس، ft.

L = طول الأساس، ft.

B = عرض الأساس، ft.

135 = كثافة الاسمنت، lb/ft^3.

W = وزن الجهاز المراد تثبيته.

3. يجب أن لا يتجاوز حمل الجلوس على التربة المواصفات القياسية للبناء، ويعطى حمل الجلوس (التوضع) بالعلاقة:

$$\text{حمل التوضع} = \frac{(2.3 - 2.5)W}{BL}$$

حيث

W = وزن الجهاز.

B = عرض الأساس، ft.

L = طول الأساس، ft.

11

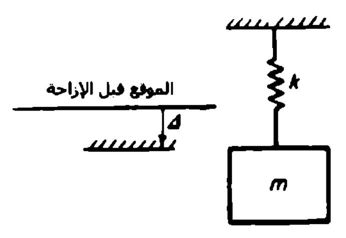
الاهتزازات

الرموز المستخدمة

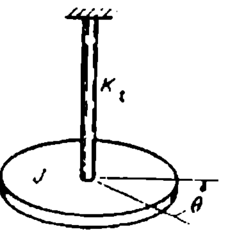
الجدول 11.1

Item	الاهتزاز المستقيم		الاهتزاز الفتلي	
	الرمز	الواحدة	الرمز	الواحدة
الزمن	t	s	t	s
الإزاحة	x	m	θ	rad
السرعة	$\dot{x}$	m/s	$\dot{\theta}$	rad/s
التسارع	$\ddot{x}$	m/s^2	$\ddot{\theta}$	rad/s^2
الكتلة العطالية	m	kg	J	Nms^2 (or) kg m^2
ثابت صلابة النابض	k	N/m (or) kg/s^2	k_t	Nm (or) kg m^2/s^2
معامل التخميد	c	Ns/m (or) kg/s	c_t	Nms (or) kg m^2/s
التردد الزاوي الطبيعي	ω_n	rad/s	ω_n	rad/s
التردد الطبيعي	f_n	Hz	f_n	Hz

الاهتزازات الحرة غير المتخامدة



الشكل 11.1 نظام نابض - كتلة



الشكل 11.2 نظام اهتزاز فتل

المعادلة التفاضلية لحركة النظام المهتز

$$m\ddot{x} + kx = 0 \qquad J\ddot{\theta} + k_t\theta = 0$$

دور الاهتزاز الطبيعي

$$\tau = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad \tau = 2\pi\sqrt{\frac{J}{k_t}}$$

حيث

$$k = \frac{W}{\Delta} \qquad k_t = \frac{\pi G d^4}{32L}$$

التردد الزاوي الطبيعي للنظام

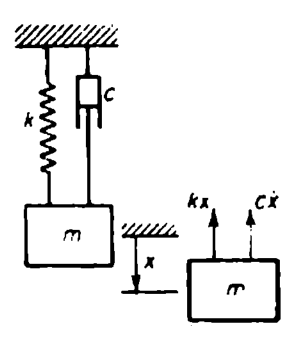
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \qquad \omega_n = \sqrt{\frac{k_t}{J}}$$

التردد الطبيعي

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_t}{J}}$$

$$= \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\Delta}}$$

الاهتزازات الحرة المتخامدة



الشكل 11.3 اهتزازات حرة مع تخميد لزج

المعادلة التفاضلية للحركة

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

الحل العام للاهتزاز الحر المتخامد

$$x = Ae^{s_1 t} + Be^{s_2 t}$$

حيث تعتبر A وB ثوابت مساعدة تعتمد قيمها على الشروط الابتدائية.

بينما تتحدد قيمتي s_1 وs_2 وفق المعادلة:

$$s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}$$
$$= \{-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}\}\omega_n$$

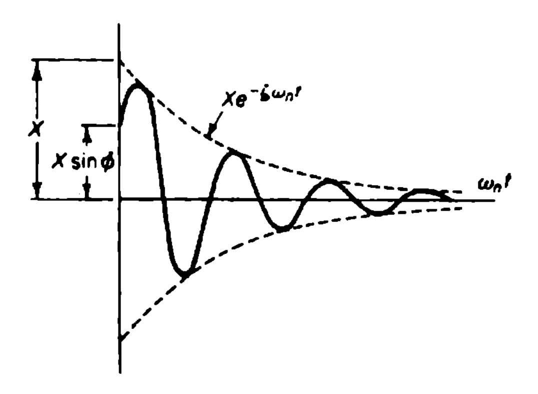
حيث

ζ = نسبة التخميد.

- c/c_c

c_c - التخميد الحرج - $2\sqrt{km} = 2m\omega_n$

الاهتزازات المتخامدة عندما $1 > \zeta$:



الشكل 11.4

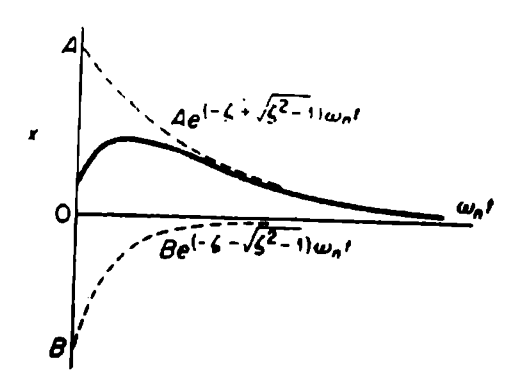
وتعطى معادلة الحل العام لنظام مخمّد:

$$x = e\zeta\omega_n.t(Ae^{i\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t} + Be^{-i\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t})$$
$$= Xe^{-\zeta\omega_n t}\sin(\sqrt{1-\zeta}\omega_n t + \phi)$$

ويعطى التردد للاهتزاز المتخامد بالعلاقة:

$$\omega_d = \sqrt{1-\zeta^{2\omega_n}}$$

أما إذا كان $1.0 < \zeta$ فيمكن عندها أن تأخذ الحركة الشكل التالي عند الشروط الابتدائية x_0 و y_0:



الشكل 11.5

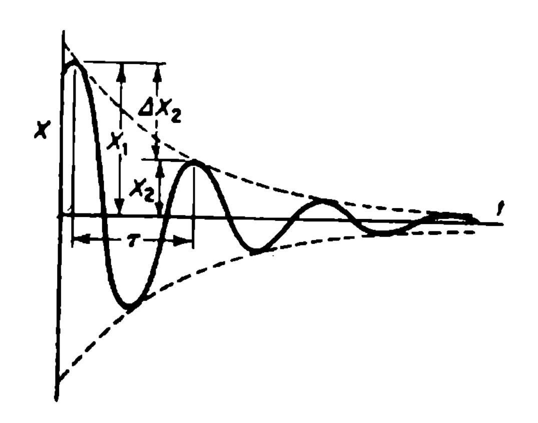
ويعطى الحل العام لنظام مع فرط تخميد كما في المعادلة:

$$x = Ae^{(-\zeta+\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} + Be^{(-\zeta-\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t}$$

أما عندما تكون $\zeta = 1.0$ فيسمى عندها تخميد حرج، ويعطى الحل كما يلي:

$$x = (A + Bt)e^{-\omega_n t}$$

وإذا كان التناقص لوغاريتمياً فتعطى معادلة الحركة كما في الشكل التالي



الشكل 11.6

وتعطى نسبة السعتين كما يلي:

$$\delta = \ln\frac{x_1}{x_2} = \ln\frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{e^{-\zeta\omega_n(t_1+\tau)}}$$
$$= \ln e^{\zeta\omega_n\tau} = \zeta\omega_n\tau$$
$$= \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{1}{n}\ln\frac{x_0}{x_n} = \frac{\Delta U}{U}$$

حيث

τ = دور الاهتزاز المتخامد = $2\pi/\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$

x_n = السعة بعد اتمام n هزة.

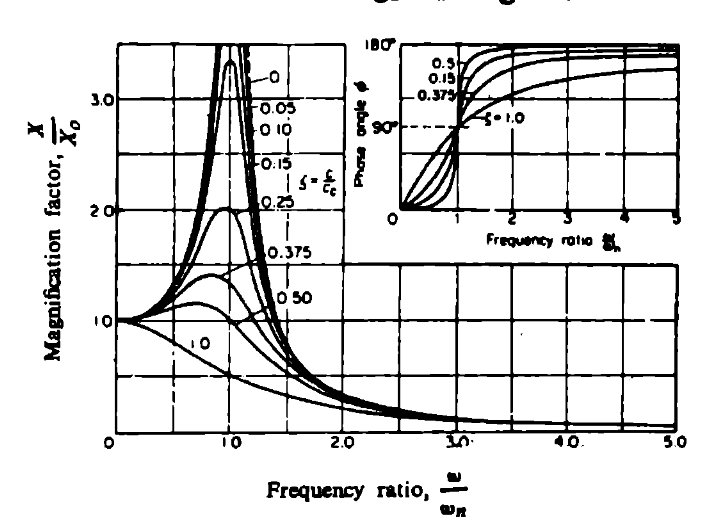
ΔU : الطاقة المبددة خلال دور.

U : الطاقة الاهتزازية.

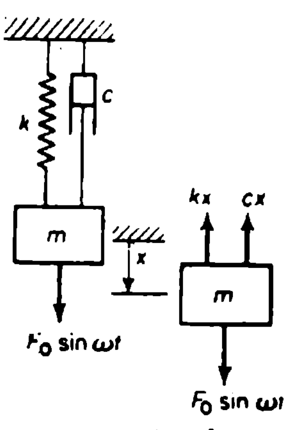
U_i = $1/2\,K\,x^2$

الاهتزازات القسرية

أ ـ حل الحالة الثابتة مع تخميد لزج



الشكل 11.8



الشكل 11.7 الاهتزاز القسري مع تخميد لزج.

المعادلة التفاضلية لحركة نظام كتلة - نابض مع تخميد لزج:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_o \sin \omega t$$

حيث تعتبر ω تردد القوة القسرية.

يعطى الحل العام للمعادلة السابقة بالعلاقة:

$$x = X_1 e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\,\omega_n t + \phi) + \frac{F_o \sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$$

ويعطى حل الحالة الثابتة للمعادلة التفاضلية السابقة بالعلاقة:

$$x = \frac{F_o \sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{(k - m\omega^2) + (c\omega)^2}}$$

عامل التكبير يعطى بالعلاقة:

$$\frac{X}{X_o} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{k}\right)^2 + \left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left\{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right\}^2}}$$

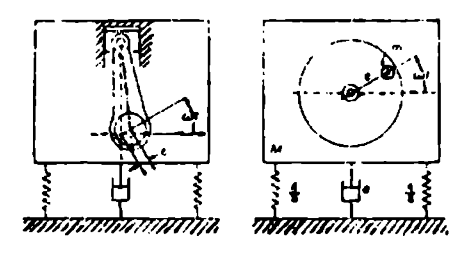
بينما تعطى زاوية الطور بالعلاقة:

$$\tan\phi = \frac{\frac{c\omega}{k}}{1-\frac{m\omega^2}{k}} = \frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

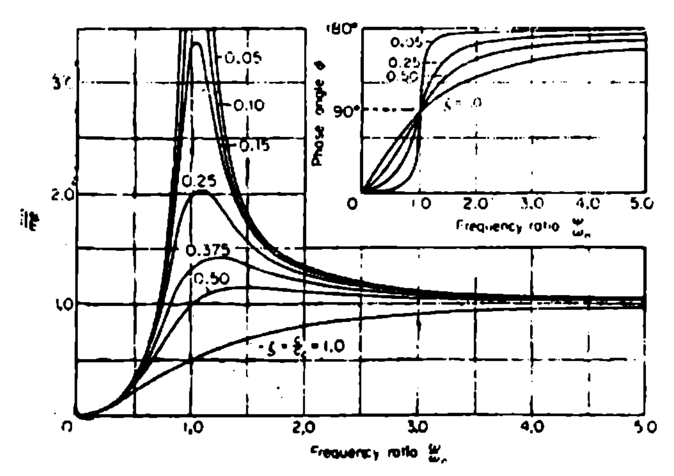
حيث

$X_o = \frac{F_o}{k}$ = الاستطاعة عند التردد الصفري لنظام كتلة ـــ نابض تحت تأثير قوة ثابتة F_o.

ب - عدم التوازن الدوراني والترددي



الشكل 11.9



الشكل 11.10

تعطى المعادلة التفاضلية للنظام كما يلي:

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = (me\omega^2)\sin\omega t$$

وتعطى السعة كما يلي:

$$X = \frac{me\omega^2}{\sqrt{(k - M\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$$

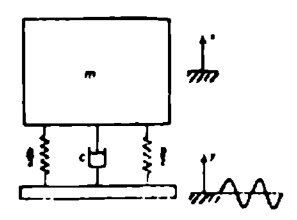
$$= \frac{\frac{m}{M}e\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left\{2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right\}^2}}$$

بينما تعطى زاوية الطور (الشكل 11.10) كما يلي:

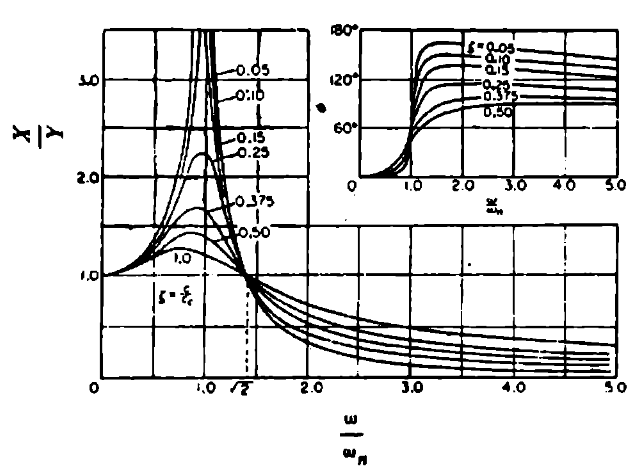
$$\tan\phi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2}$$

$$= \frac{2\zeta \dfrac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\dfrac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

ج - حالة اهتزاز القاعدة (تهييج القاعدة)



الشكل 11.11



الشكل 20.15

تعطى المعادلة التفاضلية للنظام كما يلي:

$$M\ddot{x}+c\dot{x}+kx = ky + cy$$

وتعطى القيمة المطلقة لنسبة الاستطاعة (الشكل 11.12) بالعلاقة:

$$\frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{k^2 + (c\omega)^2}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$$

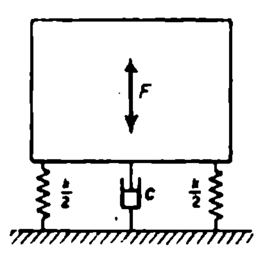
$$= \frac{1 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

بينما تعطى معادلة زاوية الطور كما يلي:

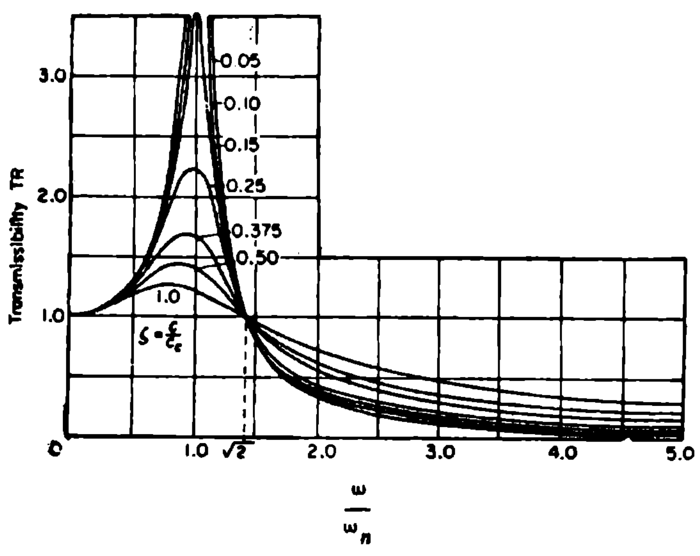
$$\tan\phi = \frac{mc\omega^3}{k^2\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\} + (c\omega)^2}$$

$$= \frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

د - عزل الاهتزاز



الشكل 11.13



الشكل 11.14

تعطى القوة المنتقلة عبر النوابض والمخمد بالعلاقة:

$$F_T = \frac{F_o\sqrt{1+\left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}}{\sqrt{\left\{1-\frac{m\omega^2}{k}\right\}^2+\left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}}$$

$$= \frac{F_o\sqrt{1+\left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}{\sqrt{\left\{1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2+\left(2\zeta\frac{c\omega}{k}\right)^2}}$$

وتعطى قابلية الانتقال TR كما يلي:

$$TR = \frac{\sqrt{1+\left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}{\sqrt{\left\{1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2+\left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

وعندما يكون التخميد مهمل عندها تعطى قابلية الانتقال بالعلاقة:

$$TR = \frac{1}{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2-1}$$

$$= \frac{1}{\frac{(2\pi f)^2\Delta}{g}-1}$$

حيث

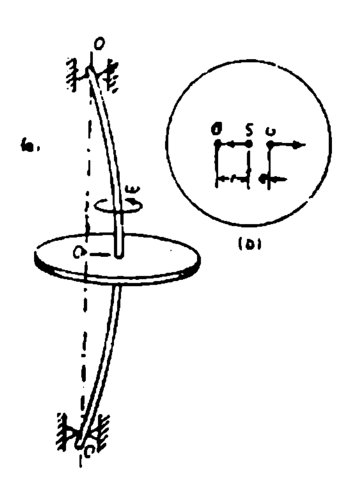
Δ = الانزياح الستاتيكي للنظام.

هـ - تدويم المحاور الدواة

تدويم محور فيه عدم توازن.

يعطى الانحراف الديناميكي بالعلاقة:

$$r = \frac{m\omega^2 e}{k - m\omega^2} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 e}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$



الشكل 11.15

حيث

$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ التردد الطبيعي للاهتزاز العرضي للمحور والقرص عند سرعة صفرية.

وتعطى السرعة الحرجة للمحور بالعلاقة:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{g}{\Delta}}$$

وتعطى السرعة الحرجة لنظام محور متعدد الدوارات عبر معادلة Dunkerely:

$$\frac{1}{\omega_c^2} = \frac{1}{\omega_s^2} + \frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} + \ldots\ldots + \frac{1}{\omega_i^2}\ldots\ldots$$

حيث

ω_s = السرعة الحرجة للمحور لوحده.

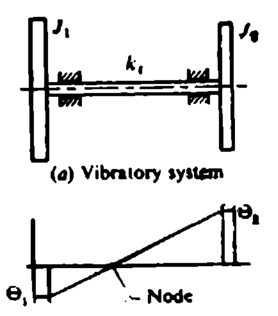
ω_1 = السرعة الحرجة للمحور عند تعرضه للوزن W_1 فقط.

ω_2 = السرعة الحرجة للمحور عند تعرضه للوزن W_2 فقط.

ω_i = السرعة الحرجة للمحور عند تعرضه للوزن W_i فقط.

الاهتزازات الفتلية

أ- نظام فيه قرصين



الشكل 11.16

وتعطى معادلتي الحركة للدوارين كما يلي:

$$J_1 \dddot{\theta}1 + k_t\theta_1 - k_t\theta_1 = 0$$

$$J_2 \dddot{\theta}2 + k_t\theta_1 - k_t\theta_2 = 0$$

وتعطى معادلة التردد كما يلي:

$$\omega^2\left\{\omega^2 - \left(\frac{k_t}{J_1} + \frac{k_t}{J_2}\right)\right\} = 0$$

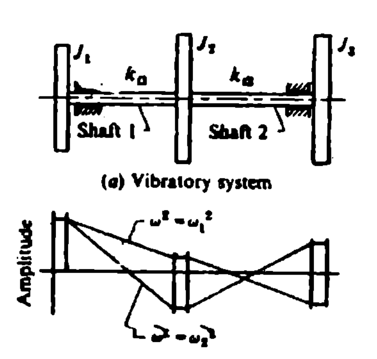
وتعطى الترددات الطبيعية للنظام كما يلي:

$$\begin{cases} \omega_{n1} = 0 \\ \omega_{n2} = \sqrt{k_t\left\{\dfrac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}\right\}} \end{cases}$$

ونسبة السعة للأنماط الأساسية:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{k_t}{k_t - J_2\omega^2} = \frac{k_t - J_2\omega^2}{k_t}$$

ب - نظام فيه ثلاثة أقراص



الشكل 11.17

الأنماط الرئيسية للاهتزاز $\omega_2^2 > \omega_1^2$.

تعطى معادلات الحركة كما يلي:

$$\begin{cases} J_1\dddot{\theta}_1 + k_{t1}(\theta_1 - \theta_2) = 0 \\ J_2\dddot{\theta}_2 + k_{t1}(\theta_1 - \theta_2) + k_{t2}(\theta_1 - \theta_3) = 0 \\ J_3\dddot{\theta}_3 + k_{t2}(\theta_3 - \theta_2) = 0 \end{cases}$$

وتعطى المعادلة الترددية التي تحدد الترددات الطبيعية لنظام بثلاث أقراص كما يلي:

$$\omega^2 \left\{ \begin{aligned} &\omega^2 - \left[k_{t1}\left(\frac{1}{J_1}+\frac{1}{J_2}\right) + k_{t2}\left(\frac{1}{J_2}+\frac{1}{J_3}\right)\right]\omega^2 \\ &+ k_{t1}k_{t2}\,\frac{J_1+J_2+J_3}{J_1J_2J_3} \end{aligned} \right\} = 0$$

ونسب السعات للأنماط الرئيسية للاهتزاز:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{k_{t1}}{k_{t1} - J_1\omega^2}$$

$$\frac{\theta_2}{\theta_3} = \frac{{k_t}^2 - J_3\omega^2}{{k_{t1}}^2}$$

الملحق

الخواص الميكانيكية لحديد الصب مع غرافيت كروي

النوع (1)	متانة الشد الأصغرية (2)	نسبة الاستطالة الصغرى (3)	مجال قساوة برينيل النموذجية (4)	التركيب الأساسي ومجال التطبيق (5)
SG 800/2	800	2	248-352	برليتي أو مراجع، له قوة شد عالية ومطيلية أقل.
SG 700/2	700	2	229-302	مكون من البرليت، له قوة شد عالية ومطيلية أقل.
SG 600/3	600	3	192-269	مكون من البرليت والفريت، له متانة شد عالية ومطيلية أقل.
SG 500/7	500	7	170-241	مكون من البرليت والفريت، له متانة شد متوسطة مع مطيلية معقولة.
SG 400/12	400	12	201, Max	مكون من الفريت، له متانة شد متوسطة مع مطيلية وصلابة كبيرتان نسبياً.
SG 370/17	370	17	179, Max	مكون من الفريت، وهو مقاوم عالي للصدم.

الخواص الميكانيكية لحديد الصب الرمادي

النوع (See IS: 4843-1968)	متانة الشد الأصغرية (N/mm^2)	قساوة برينيل (HB)
FG 150	150	130 to 180
FG 200	200	160 to 220
FG 220	220	180 to 220
FG 260	260	180 to 230
FG 300	300	180 to 230
FG 350	350	207 to 241
FG 400	400	207 to 270

الخواص الميكانيكية للفولاذ ذو مقاومة الشد العالية

النوع (1)	الرمز التصميمي (2)	متانة الشد الأصغرية (MN/m^2) (3)	إجهاد الخضوع (0.5 بالمئة) (إجهاد تجريبي) (4)	التناقص الأصغري في المساحة (5)	استطالة طول قياسي $= 5.65\sqrt{50}$ (6)	قساوة برينيل الصغرى (7)	متانة صدم Izod الصغرى (J) (8)
1	CS 640	640	390	35	15	190	30
2	CS 700	700	560	30	14	207	30
3	CS 840	840	700	28	12	248	28
4	CS 1030	1030	850	20	8	305	20
5	CS 1230	1230	1000	12	5	355	-

الخواص الميكانيكية والصلادة للفولاذ الكربوني المطروق المستخدم لأهداف هندسية عامة

النوع (1)	الرمز التصميمي (2)	متانة الشد الأصغرية N/mm2 (3)	إجهاد الخضوع الأصغري N/mm2 (4)	نسبة الاستطالة $5.65\sqrt{S_0}$ (5)	الصلادة الصغرى BHN (6)	درجة حرارة التطبيع C (7)
1 A	15 C 8	410	220	25	110	880-910
2	20 C 8	430	230	24	120	880-910
2 A	25 C 8	460	250	22	130	880-910
3	30 C 8	490	270	21	140	860-890
3 A	35 C 8	540	280	20	155	850-880
4	45 C 8	620	320	15	175	830-860
5	55 C 8	710	350	13	200	810-840
6	65 C 6	740	370	10	210	800-830

ملاحظة: لقد أخذت الخصائص الموجودة في هذا الجدول لعينة على شكل قضيب بقطر 100 MM مطروق ومطبع وتم الاختبار وفق اتجاه استطالة الحبيبات.

مواصفات واستخدامات الفولاذ الكربوني

التسمية (وفق ISI)	% C	% Mn	متانة الشد /mm2	إجهاد الخضوع N/mm2	نسبة الاستطالة الأصغرية (الطول المقاس $5.65\sqrt{A}$ ولعينة اختبار دائرية)	قساوة برينيل (HB) No.	الاستخدامات المقترحة
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
C 07	0.12 max	0.50 max	314-392	196	27	-	تشكيل على البارد وسحب عميق، جيد الحواف ويستخدم في هياكل السيارات والبراشيم، ويستخدم المطفأ منه في المطروقات.
C 10	0.15 max	0.30 - 0.60	333 - 412	206	26	-	نفس الاستخدام
C14	0.10 - 0.18	0.40 - 0.70	363 - 441	216	26	137	أعمدة الكامات، الكامات، المسننات خفيفة الأداء، المسننات الدودية، بنــز الكباس المحاور، السقاطات، دواليب السلاسل، الغمازات،... الخ.
C15	0.20 max	0.30 - 0.60	363 - 481	235	25	137	البراشيم العاملة على البارد
C15 Mn 75	0.10 - 0.20	0.60 - 0.90	412 - 490	245	25	163	للعناصر ذات الإجهاد المنخفض وللأهداف العامة.
C 20	0.15 - 0.25	0.60 - 0.90	432 - 510	245	24	156	للعناصر ذات الإجهاد المنخفض وللأهداف العامة.
C25	0.20 - 0.30	0.30 - 0.60	432 - 520	275	27	170	للعناصر ذات الإجهاد المنخفض وللأهداف العامة.

مواصفات واستخدامات الفولاذ الكربوني /تابع/

التسمية (وفق ISI)	% C	% Mn	متانة الشد /mm2	إجهاد الخضوع N/mm2	نسبة الاستطالة الأصغرية (الطول المقاس $5.65\sqrt{A}$ ولعينة اختبار دائرية)	قساوة برينيل (HB) No.	الاستخدامات المقترحة (8)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
C25 Mn 75	0.20 - 0.30	0.60 - 0.90	461 - 560	275	22	207	للعناصر ذات الإجهاد المنخفض وللأهداف العامة.
C30	0.25 - 0.35	0.60 - 0.90	490 - 588	294	21	179	العتلات المشكلة على البارد، مسامير الربط المقساة والمراجعة، الكابلات الدواليب المسننة، الجلب، أنابيب الفولاذ، ... الخ.
C35	0.30 - 0.40	0.30 - 0.60	510-608	304	20	187	للعناصر المعرضة لإجهادات قليلة، أنابيب السيارة وأدوات الربط.
C35 Mn 75	1.30 - 0.40	0.60 - 0.90	540 - 637	314	20	223	للأجزاء المعرضة لإجهادات قليلة، إطارات الدراجات والدراجات النارية، عارضات الربط لوصل السكك الحديدية
C 40	0.35 - 0.45	0.60 - 0.90	570 - 667	324	18	217	العمود المرفقي (الكرنك)، المحاور، محاور الدوران، والمحاور الحاملة، أذرعة الدفع وأذرعة التوصيل، الجاويطات، البراغي، المسننات، ...الخ.

مواصفات واستخدامات الفولاذ الكربوني /تابع/

التسمية (وفق ISI)	% C	% Mn	متانة الشد /mm2	إجهاد الخضوع N/mm2	نسبة الاستطالة الأصغرية (الطول المقاس $5.65\sqrt{A}$ ولعينة اختبار دائرية)	قساوة برينيل (IIB) No.	الاستخدامات المقترحة (8)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
C 45	0.40 - 0.50	0.60 - 0.90	618 - 696	353	15	229	المحاور والبراغي والمسننات ومحاور الدوران لآلات التشغيل.
C 50	0.45 - 0.55	0.60 - 0.90	647 - 765	373	13	241	المحاور، الخوابير، الاسطوانات، الأجزاء المقساة للمسننات الدودية والدودات.
C 50 Mn	0.45 - 0.55	1.00 - 1.10	706 (min)	392	11	255	فولاذ السكك الحديدية، البراغي، محاور المسننات، الأذرع المهتزة وبطانات الاسطوانات.
C 55 Mn 75	0.50 - 0.60	0.60 - 0.90	706 (min)	392	13	265	الخوابير، أعمدة المرافق، الاسطوانات، الكامات، المسننات، أسنان المسننات، للأجزاء المراد منها إعطاء مقاومة اهتراء متوسطة.
C 60	0.55 - 0.65	0.50 - 0.80	736 (min)	412	11	255	البراغي والصواميل المقساة، أعمدة المرافق، المحاور، القارنات، المسننات والأعمدة الدوارة في آلات التشغيل.
C 65	0.60 - 0.07	0.50 - 0.80	736 (min)	422	10	255	عربات القاطرات وإطارات المركبات، نوابض صمامات المحرك، الرنديلات والأختام الدقيقة.

قيم إجهادات الشد والخضوع للفولاذ المطروق القياسي

التسمية	متانة الشد (N/mm2)	إجهاد الخضوع الأصغري (N/mm2)	نسبة الاستطالة الأصغرية (الطول المقاس $5.65\sqrt{A}$)
(1)	(2)	(3)	(4)
Fe 290	290	170	27
FeE 220	290	220	27
Fe 310	310	180	26
FeE 230	310	230	26
Fe 330	330	200	26
FeE 250	300	250	26
Fe 360	360	220	25
FeE 270	360	270	25
Fe 410	410	250	23
FeE 310	410	310	23
Fe 490	490	290	21
FeE 370	490	370	21
Fe 540	540	320	20
FeE 400	540	400	20
Fe 620	620	380	15
FeE 460	620	460	15
Fe 690	690	410	12
FeE 520	690	520	12
Fe 770	770	460	10
FeE 580	770	580	10
Fe 870	870	520	8
FeE 650	870	550	8

خصائص واستخدامات الفولاذ الخلائطي

التسمية (1)	متانة الشد MN/m2	حد الخضوع MN/m2	الاستطالة الأصغرية ($e = 6.55\sqrt{a}$)	صدم Izod الأصغري value, Nm	قساوة برينل No. HB	الاستخدامات المقترحة
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
20 Mn 2	588-736	432	18	47.07	170-217	للهياكل الملحومة، العمود المرفقي (كرنك)، محاور الدوران، القطع القائدة.
	687-834	490	16	47.07	201-248	
27 Mn 2	588-736	432	18	47.07	170-217	للهياكل الملحومة، العمود المرفقي (كرنك)، محاور الدوران، القطع القائدة.
	687-834	490	16	47.07	201-248	
37 Mn 2	588-736	432	18	47.07	170-217	
	687-834	530	18	47.07	201-248	العمود المرفقي، المحاور، أذرع التوصيل
	785-932	588	16	47.07	229-277	
	882-1030	687	15	40.21	255-311	
35 Mn 2 Mo 28	687-834	530	18	54.00	201-248	العمود المرفقي، العتلات، البراغي وأذرع التوصيل
	785-932	588	16	54.00	229-277	
	882-1030	687	15	54.00	255-311	
	981-1128	785	13	47.07	285-341	

خصائص واستخدامات الفولاذ الخلائطي /تابع/

التسمية (1)	متانة الشد MN/m2	حد الخضوع MN/m2	الاستطالة الأصغرية $(e = 6.55\sqrt{a}$	صدم Izod الأصغري value, Nm	قساوة برينيل No. HB	الاستخدامات المقترحة
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
35 Mn 2 Mo 45	785-932	588	16	54.00	229-277	العمود المرفقي، العتلات، البراغي وأذرع التوصيل
	882-1030	687	15	54.00	225-311	
	981-1128	785	13	47.07	285-341	
40 Cr 1	678-834	530	18	54.00	201-248	أذرع التوصيل، المسننات، الصفائح المقاومة للاهتراء، ... الخ.
	785-932	588	16	54.00	229-277	المحاور، المسننات، البراغي، الجاويطات.
	882-1030	687	15	54.00	255-311	
40 Cr 1 Mo 28	687-834	530	18	54.00	201-248	
	785-932	588	16	54.00	229-277	
	882-1030	687	15	54.00	255-311	
	981-1128	785	13	47.07	255-341	
15 Cr 3 Mo 55	687-834	530	18	54.00	201-248	للأجزاء التي تحتاج لسطح عالي القساوة ولطبقة مقاومة للاهتراء.
and	785-932	588	16	54.00	229-277	
25 Cr 3 Mo 55	882-1030	687	15	54.00	255-311	

خصائص واستخدامات الفولاذ الخلائطي /تابع/

التسمية (1)	متانة الشد MN/m2	حد الخضوع MN/m2	الاستطالة الأصغرية $(e = 6.55\sqrt{a}$	صدم Izod الأصغري value, Nm	قساوة برينيل No. HB	الاستخدامات المقترحة
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	981-1128	785	13	47.07	285-341	
	1080-1226	863	12	40.21	311-363	
	1520 min	1275	8	13.73	444 Min	
40 Cr 3 Mo 1 V 20	1324 min	1098	8	20.60	363 min	للعناصر المعرضة لقوى شد عالية.
	1520 min	1275	8	13.73	444 min	
40 Cr 2 Al 1 Mo 18	687-834	530	18	54.00	201-248	للعناصر التي تحتاج لقساوة سطحية عالية ونواة متينة.
	785-932	588	16	54.00	229-277	
	822-1030	687	15	37.27	255-311	
40 Ni 3	785-932	588	16	54.00	229-277	التطريق الثقيل، شفرات العنفات، براغي عالية الإجهاد، البراغي والصواميل، ومستخدم عند درجات الحرارة المنخفضة (مجمدات، ضواغط).
	822-1030	687	15	54.00	255-311	

خصائص واستخدامات الفولاذ الخلائطي /تابع/

التسمية (1)	متانة الشد MN/m2	حد الخضوع MN/m2	الاستطالة الأصغرية ($e = 6.55\sqrt{a}$)	صدم Izod الأصغري value, Nm	قساوة برينيل No. HB	الاستخدامات المقترحة
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
35 Ni 1 Cr 60	687-834	530	18	54.00	201-248	للطائرات وعناصر العربات الثقيلة.
	785-932	588	16	54.00	229-277	
	882-1030	687	15	54.00	255-311	
30 Ni 4 Cr 1	1520 min	1275	8	13.73	444 min	للمسننات ذات الإجهاد العالي.
40 Ni Cr 1 Mo 15	785-932	588	16	54.00	229-277	المسننات والبراغي، ... الخ
	882-1030	687	15	54.00	225-311	
	981-1128	785	13	47.07	285-431	
	1080-1226	863	11	40.21	311-363	
40 Ni 2 Cr 1 Mo 28	785-932	588	16	54.00	229-277	أجزاء الآلات المعرضة لقوى عالية مثل المسننات، البراغي، محاور الدوران، أدوات الربط، ... الخ.
	882-1030	687	15	54.00	255-311	
	1080-1128	785	13	47 07	255-341	
	1080-1226	863	11	40.21	311-363	

خصائص واستخدامات الفولاذ الخلائطي /تابع/

التسمية (1)	متانة الشد MN/m2	حد الخضوع MN/m2	الاستطالة الأصغرية $(e = 6.55\sqrt{a}$	صدم Izod الأصغري value, Nm	قساوة برينيل No. HB	الاستخدامات المقترحة
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	1180-1324	981	10	29.42	341-401	
	1520 min	1275	6	10.79	444 min	
40 Ni 2 Cr 65 Mo 55	981-1128	785	12	47.07	285-341	للبراغي المعرضة لإجهادات عالية، مسننات، محاور، مثبتات عدة، ... الخ.
	1080-1226	863	11	40.21	311-363	
	1180-1324	981	10	34.32	341-401	
	1520 min	1275	8	13.73	444 min	

الخواص الميكانيكية للفولاذ الأوستينيتي المنعّم البنية غير القابل للصدأ قضبان، صفائح، ألواح، شرائط

تسمية الفولاذ	قساوة برينيل	إجهاد الصمود الأصغري 20 %	قوة الشد	نسبة الاستطالة		نسبة الاستطالة ألواح، شرائط	
				قضبان من 5 to 100 mm	صفائح من 3 to 30 mm	من 0.5 to 3 mm	من 3 to 30 mm
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
02Cr18Ni11	192	180	440 to 650	40	40	38	40
04Cr18Ni10	192	200	490 to 690	40	40	38	40
07Cr18Ni9	192	210	490 to 690	40	40	38	40
10Cr17Ni7	212	220	590 to 780	-	40	38	40
04Cr18Ni10Ti20	192	210	490 to 690	35	35	33	35
04Cr18Ni10Nb40	192	210	490 to 690	35	35	33	35
04Cr17Ni12Mo20	192	210	490 to 690	40	40	38	40
02Cr17Ni12Mo2	192	200	440 to 640	40	40	38	40
04Cr17Ni12Mo2Ti20	192	220	490 to 690	35	35	33	35
10Cr17Mn6N14	217	300	640 to 830	40	40	38	40
15Cr24Ni13	-	210	490 to 690	40	40	-	-
20Cr25Ni20	-	210	490 to 690	40	40	-	-

خصائص حديد الزهر القياسي

المعدن	المقاومة النهائية MN/m2		حد التحمل في حالة الانحناء المتكرر Mn/m^2 σ u	رقم قساوة برينيل	معامل المرونة		الاستطالة عند 50 mm %	ملاحظات والاستخدام المقترح
	شد σ u	ضغط σ u			شد وضغط GN/m^2	قص GN/m^2		
Gray, ordinary	124	557	62	100-150	69-82	28	0-1	للسكب الصناعي العام
Gray, good	166	690	82	100-150	82	33	0-1	اسطوانات المضخات
Gray, high grade	207	828	103	100-150	96	38	0-1	للمسكوبات الهامة
Malleable, S.A.E. 32510	345	828	173	100-145	160	64	10	بديل عن المطروقات غير الهامة
Nickel alloys: Ni-0.75, C-3.40, Si-1.75 Mn0.55,	221 166	828	110	200	103	41	1-2	إطارات الآلات الخفيفة
Ni-2.00, C-3.00, Si-1.10, Mn-0.80.	276 214	1080	138	220	138	55	1-2	لاسطوانات الديزل الثقيلة، المضخات وهياكل الصمامات، طاولات آلات التشغيل الخفيفة.
Nickel-chromium alloys: Ni-0.75, Cr-0.30, C-3.40, Si-1.90, Mn-0.65	221	862	110	200	103	41	1-2	اسطوانات المحركات الخفيفة
Ni-2.75, Cr-0.80, C-3.00, Si-1.25, Mn-0.60.	310	1103	152	300	138	55	1-2	قوالب التشكيل الثقيلة.

$1\ MN/m^2 = (1/9.80665)\ kgf/mm^2$

$GN/m^2 = (1000/9.80665)\ kgf/mm^2$

الخصائص العامة للفولاذ الخلائطي والكربوني

المعدن	المقاومة النهائية شد σu MN/m^2	المقاومة النهائية قص τu MN/m^2	إجهاد الخضوع MN/m2 شد وضغط σyp	إجهاد الخضوع MN/m2 قص τyp	حد التحمل في حالة الانحناء المتكرر MN/m2 σen	رقم قساوة برينيل	معامل المرونة شد وضغط E GN/m^2	معامل المرونة قص G GN/m^2	الاستطالة عند 50 mm %	ملاحظات والاستخدام المقترح
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
فولاذ كربوني										
حديد مطاوع	332	345	186	110	173	100	193	77.5	30-40	
فولاذ صب، طري	414	290	186	110	180	110	207	82.0	22 18 15	لأهداف الصب العام.
وسط	483	338	218	131	207	120	207	82.0		
قاسي	552	386	248	145	234	130	207	82.0		
S.A.E. 10.25, ملدن	462	282	234	138	200	120	207	82.0	26	
مسقى بالماء	538	380	282	166	296	159			35	فولاذ آلات
	621	435	400	234	345	183	207	82.0	27	للاستخدام العام

الخصائص العامة للفولاذ الخلائطي والكربوني /تابع/

المعدن	المقاومة النهائية شد σu MN/m^2	المقاومة النهائية قص τu MN/m^2	إجهاد الخضوع MN/m2 شد وضغط σyp	إجهاد الخضوع MN/m2 قص τyp	حد التحمل في حالة الانحناء المتكرر MN/m2 σen	رقم قساوة برينيل)	معامل المرونة شد وضغط E GN/m^2	معامل المرونة قص G GN/m^2	الاستطالة عند 50 mm %	ملاحظات والاستخدام المقترح
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
S.A.E. 1045, ملدن	586	414	310	180	289	140	207	82.0	20	للمطروقات
مسقى بالماء	655	462	414	241	365	197			28	الكبيرة محاور،
	828	580	621	360	462	248	207	82.0	15	
مسقى بالزيت	662	462	428	241	365	192			22	
	793	552	552	310	448	235	207	82.0	16	
S.A.E 1095, ملدن	760	520	380	228	360	200	207	82.0	20	النوابض، أجهزة القطع
مسقى بالزيت	896	586	455	270	470	300			16	
	1300	828	896	520	690	380	207	79.4	10	

الخصائص العامة للفولاذ الخلائطي والكربوني /تابع/

المعدن	المقاومة النهائية: شد σu MN/m^2	المقاومة النهائية: قص τu MN/m^2	إجهاد الخضوع MN/m2: شد وضغط σyp	إجهاد الخضوع MN/m2: قص τyp	حد التحمل في حالة الانحناء المتكرر MN/m2 σen	رقم قساوة برينيل	معامل المرونة: شد وضغط E GN/m^2	معامل المرونة: قص G GN/m^2	الاستطالة عند 50 mm %	ملاحظات والاستخدام المقترح
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
فولاذ خلائطي										
Nickel: S.A.E. 2320,										
مسقى بالماء	504	380	345	207	338	143	207	82	30	دعامات مقساة السطح للأجزاء الثقيلة وهو غير مرغوب
	965	676	758	448	470	277			18	
مسقى بالزيت	527	373	332	200	318	140	207	82	30	للمسننات ذات المقاطع الصغيرة (القليلة).
	896	621	690	414	345	262			18	
S.A.E. 2340 مسقى بالماء	655	414	448	262	365	183	207	89	30	للمطروقات، المحاور
	1206	758	1035	600	517	340			16	
مسقى بالزيت	641	407	428	248	380	183	207	82	17	المسننات
	1138	724	1020	586	517	330			14	

الخصائص العامة للفولاذ الخلائطي والكربوني /تابع/

المعدن	المقاومة النهائية: شد σu MN/m^2	المقاومة النهائية: قص τu MN/m^2	إجهاد الخضوع MN/m2: شد وضغط σyp	إجهاد الخضوع MN/m2: قص τyp	حد التحمل في حالة الانحناء المتكرر MN/m2 σen	رقم قساوة برينيل	معامل المرونة: شد وضغط E GN/m^2	معامل المرونة: قص G GN/m^2	الاستطالة عند 50 mm %	ملاحظات والاستخدام المقترح
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Nickel-chromium	593	414	393	234	380	174	207	82	34	مقاطع كبيرة تتطلب تقسية سطوح متوسط العمق.
S.A.E. 3120, مسقى بالماء	965	676	792	470	400	269			15	
مسقى بالزيت	504	380	331	200	317	163	207	82	30	للمقاطع المصمتة الكبيرة التي تحتاج لتقسية عميقة للسطوح
	828	565	662	393	331	241			18	
S.A.E. 3220, مسقى بالماء	600	414	414	248	400	187	207	82	23	
	1138	792	986	573	496	331			16	
مسقى بالزيت	552	386	364	214	352	174	207	82	30	
	380	738	896	655	448	311			20	
S.A.E. 3240, مسقى بالزيت	758	503	600	360	580	229	207	82	23	كرات المدحرجات، الأسنان، المسننات
	1380	896	1240	724	621	388			14	

الخصائص العامة للفولاذ الخلائطي والكربوني /تابع/

المعدن	المقاومة النهائية شد σu MN/m^2	المقاومة النهائية قص τu MN/m^2	إجهاد الخضوع MN/m2 شد وضغط σyp	إجهاد الخضوع MN/m2 قص τyp	حد التحمل في حالة الانحناء المتكرر MN/m2 σen	رقم قساوة برينيل	معامل المرونة شد وضغط E GN/m^2	معامل المرونة قص G GN/m^2	الاستطالة عند 50 mm %	ملاحظات والاستخدام المقترح
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
S.A.E. 4140,	828	621	690	380	414	240	207	82	25	
مسقى بالزيت	1310	1035	1138	628	655	380	-	-	12	
Chromium-vanadium:	724	517	676	373	654	220	207	82	25	
S.A.E 6145, مسقى بالزيت	1586	1242	1448	1448	724	425	-	-	12	
Silicon-manganese: S.A.E. 9260, مسقى بالزيت	1090	828	690	414	428	240	207	82	16	مسننات، نوابض
Stainless	621	414	241	138	276	135	207	82	60	الدلفنة على الساخن
steel, 0 12C, 180 cr, 8.0 Ni	1380	1035	1206	690	621	380	-	-	5	العمل على البارد.

$1\ GN/m^2 = (1000/9.80665)\ kgf/mm^2$

$1\ MN/m^2 = (1/9.80665)\ kgf/mm^2$

قيم عوامل الأمان المفضلة والموصى باستخدامها

المعدن	للحمولات الثابتة	للحمولات المتغيرة	لحمولات الصدم
حديد الزهر	5 to 6	8 to 12	16 to 20
الحديد المطاوع	4	7	10 to 50
الفولاذ	4	8	12 to 60
الخلائط والمعادن الطرية	6	9	15
الجلد	9	12	15
دعامات خشبية	7	10 to 15	20

جدول بعوامل الضرب الكبيرة والصغيرة

الرمز	التسمية	قيمة العامل
T	tera†	$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$
G	giga	$1\ 000\ 000\ 000 = 10^{9}$
M	mega	$1\ 000\ 000 = 10^{6}$
k	kilo	$1\ 000 = 10^{3}$
h	hecto	$100 = 10^{2}$
da	deca	$10 = 10^{1}$
d	deci	$0.1 = 10^{-1}$
c	centi	$0.01 = 10^{-2}$
m	milli	$0.001 = 10^{-1}$
μ	micro	$0.000\ 001 = 10^{-6}$
n	nano	$0.000\ 000\ 001 = 10^{-9}$
p	pico	$0.000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$
f	femto	$0.000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-15}$
a	atto	$0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$

جدول المحتويات

5 عناصر الآلات ومعادلات الوثوقية 103

8 معادلات الترموديناميك 301

11 الاهتزازات.. 463


منتدى إقراء الثقافي

Mechanical Engineering Portable Reference

دليل المهندس الميكانيكي

يعتبر هذا الدليل مرجعاً سهلاً يحوي آلاف المعادلات التي يحتاجها المهندس الميكانيكي في حياته العملية مجموعة في كتاب واحد، من الإجهادات إلى معادلات الاهتزازات وتصميم المدحرجات والمسننات والسيور، ومعادلات هندسة الطاقة وهندسة الموائع ومعادلات التدفئة والتكييف، وهناك أيضاً معادلات تجريبية وضعها مهندسون محترفون يملكون سنوات طويلة من الخبرة والعديد من المواضيع الهندسية التي يحتاجها كل مهندس ميكانيكي أثناء عمله.





http://www.raypub.com